UNIVERSITÁ CA’ FOSCARI VENEZIA

Dipartimento di Studi Umanistici

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

TECNICHE DI DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA SUBACQUEA PER L'ARCHEOLOGIA MARITTIMA

RELATORE
PROF. CARLO BELTRAME

CORRELATORE
PROF. SAURO GELICHI

LAUREANDO: ALESSIO FEDERICO TENENTI
MATRICOLA N° 813416

ANNO ACCADEMICO 2012 – 2013

Ad Adriano

INDICE

PRESENTAZIONE

Il presente studio si propone di offrire un contributo all'affinamento delle tecniche di documentazione fotografica subacquea applicata a contesti archeologici marittimi.

Esso prende avvio con carattere introduttivo e generale dalla storia della fotografia, con particolare attenzione agli aspetti subacquei, presentandone i concetti chiave per fornire strumenti di lettura anche ai neofiti del settore. Si concentra poi sulle applicazioni adottate per la ricostruzione di un sito archeologico quali la produzione di fotomosaici e fotogrammetrie. Prosegue con la presentazione a livello teorico delle suddette tecniche, ripercorrendo per ognuna le evoluzioni subite nel corso del tempo, grazie principalmente allo sviluppo tecnologico delle attrezzature, proponendo alcuni degli esempi più significativi del loro impiego. Passa quindi all’esame di tre casi studio, ai quali lo scrivente ha avuto la possibilità di partecipare direttamente, ossia il relitto ottocentesco del *Mercurio* nell'alto Adriatico, il relitto denominato *Punta Scifo D* datato al III secolo d. C. presso la costa calabra ed il relitto di XI-XII secolo dell'isola di Mljet in territorio croato. Per ognuno dei tre casi viene proposto l'esame delle tecniche di documentazione fotografica utilizzate, anche a livello sperimentale, in base ai diversi fattori che caso per caso si sono dovuti considerare: i contesti ambientali e naturali completamente diversi in cui si trovano i tre relitti; il grado di accuratezza e precisione determinato dalle differenti tipologie di reperti archeologici da documentare; non ultimi disponibilità finanziare, risorse umane e tempi di lavoro concessi di volta in volta.

In fine vengono messi in luce i pregi e i limiti di ognuna delle tecniche analizzate, paragonandole tra loro e, come nel caso del terzo relitto, ipotizzando possibili miglioramenti con soluzioni alternative.

INTRODUZIONE

Si consideri che in archeologia la registrazione di una documentazione analitica è un processo universalmente ritenuto indispensabile[1].

Un sito, soprattutto in contesto subacqueo, può mutare nel tempo anche solo attraverso l'azione degli agenti naturali ed uno scavo archeologico, in quanto tale, ha inevitabilmente carattere distruttivo: da ciò nasce l'esigenza di documentarne ciascuna fase, prima e durante le operazioni di scavo stesso, per mantenere una testimonianza indelebile di ogni situazione riscontrata ed è altresì importante che ciò sia analizzabile, anche successivamente, in qualsiasi momento e luogo[2].

Esemplificativo è il caso del relitto denominato *Grand Congloué* presso Marsiglia e delle ricerche condotte a partire dal 1952 dal team di Jacques-Yves Cousteau, sotto la direzione scientifica di Fernand Benoit. Se quello scavo ha il pregio di essere ricordato come il primo eseguito da una equipe di subacquei dotati di autorespiratori ad aria e muniti di sorbona, ha purtroppo il drammatico limite di non essere stato corredato da una adeguata documentazione, considerato inoltre che si protrasse per più di cinque anni e con operazioni a carattere perlopiù distruttivo. Ciò ha decretato la perdita di parte del suo valore scientifico, rendendone estremamente difficoltose le successive interpretazioni[3]. L'irrecuperabile identità di tale patrimonio ha però costituito un importante punto di non ritorno per la comunità scientifica che si è resa consapevole dell'importanza di non ripetere più simili errori[4].

Idealmente dunque dovrebbe essere possibile ricostruire un sito anche a studiosi che non lo abbiano mai fisicamente indagato, solo disponendo dell'archivio dei dati accumulati su di esso. Per tali motivi è indispensabile produrre una documentazione che non solo sia rispondente a tutte le caratteristiche dell'oggettività – è fondamentale qualsiasi tentativo volto a limitare al massimo il

[1] BASS 1970, p. 82.

[2] DRAP 2012, p. 111.

[3] Per una panoramica sugli scavi e gli studi condotti sul *Grand Congloué* si veda LONG 1987, pp. 9-36, da cui è possibile ricostruire come probabilmente si sia trattato addirittura di due relitti sovrapposti, dei quali il primo naufragato forse tra il 210 ed il 180 a. C., ed il secondo tra il 110 ed il 70 a. C., in base alle interpretazioni dei reperti costituenti i carichi ritrovati.

[4] BASS 1970, p. 89.

rischio della soggettività - ma che sia anche archiviabile in modo tale che chiunque vi possa aver accesso e sia altresì conservabile su supporti duraturi nel tempo[5].

Da qui derivano vincoli ed emergenze che ogni volta dovranno essere attentamente vagliati. E se, all'interno di un progetto di scavo, il programma per la registrazione dei dati si determina ovviamente in base al tempo e ai fondi a disposizione nonché alle condizioni fisiche e ambientali del sito, in ogni caso il primo documento irrinunciabile da elaborare è la riproduzione complessiva dell'area di scavo: unico e primo strumento che permette di comprenderne il perimetro, la complessità e tutti gli elementi ed i dettagli superficiali caratterizzanti[6]. Esso può concretizzarsi in forma di una planimetria bidimensionale oppure di un rilievo tridimensionale talché, negli anni, molte sono state le tecniche sviluppate per semplificarne e ottimizzarne la produzione. La ricerca si avvale di tutte le possibili innovazioni tecnologiche, ma la fotografia costituisce ancora sicuramente una delle soluzioni più valide ed accessibili.

E' facilmente intuibile come un archeologo che lavori su un sito sommerso non abbia la stessa "accessibilità" allo scavo rispetto ad un collega che operi su uno di terra; ciò è dettato in primo luogo dai tempi di immersione, per qualsiasi subacqueo inevitabilmente ed obbligatoriamente limitati in relazione alla profondità del sito interessato, dalla necessità dell'utilizzo di specifiche attrezzature per raggiungerlo e di conseguenza dall'impossibilità di potervi tornare con facilità o in un qualsiasi momento per continuare, verificare o ripetere determinate operazioni. Potendo essere impiegata anche per estrapolare informazioni metriche, la fotografia è la tecnica che meglio soddisfa la richiesta di praticità di utilizzo e velocità di esecuzione sul campo, piuttosto che tradizionali tecniche di rilevamento come la trilaterazione[7]. Per cogliere l'entità dello scarto temporale è significativo il confronto che Green propone. La tecnica fotografica da lui utilizzata in associazione al software *PhotoModeler* - seppur limitata a contesti con buona visibilità - ha richiesto soltanto 10 minuti per effettuare tutte le riprese subacquee e altri 25 per scaricarle ed elaborarle, contro gli 86 minuti che sono stati necessari per la documentazione grafica, senza contare la fase successiva di trattamento dei dati, rilevando lo stesso soggetto con misure manuali[8]. Le fotografie inoltre offrono il non trascurabile vantaggio di informazioni aggiuntive e secondarie, che si possono estrapolare da tutti gli scatti effettuati, utili per sopperire a eventuali mancanze o

---

[5] BOWENS 2009, p. 53.

[6] GREEN 1990, p. 53.

[7] GREEN 1990, p. 99.

[8] GREEN 2004, p. 155.

inesattezze dei dati registrati sul campo e senza le quali sarebbe inevitabilmente necessario tornare sul sito per ripetere la misura, cosa raramente fattibile in un contesto sommerso[9].

Durante una campagna archeologica è indispensabile muoversi all'interno di alcune linee programmatiche tenendole sempre presenti poiché differenziate, e tutte egualmente importanti, sono le finalità sottese all'esecuzione delle riprese fotografiche. Esse si possono così sintetizzare:

1 documentazione panoramica dell'area di scavo;
2 produzione di un insieme di fotogrammi, eseguiti secondo una precisa tecnica, che permetta di realizzare una ricostruzione generale e descrittiva del sito, possibilmente un rilievo tridimensionale;
3 documentazione delle attività e del loro progresso, che mostrino quindi come siano state materialmente condotte tutte le operazioni archeologiche;
4 documentazione dei singoli reperti.

Fondamentale è decidere a priori in quale di queste quattro tipologie si colloca ogni singolo scatto fotografico che si andrà ad eseguire, in modo che in ogni immagine sia messo ben in risalto l'elemento chiave fotografato in rapporto alla finalità e possano essere evidenziati determinati particolari piuttosto che altri[10].

Scaturisce da qui un aspetto che investe qualità professionali dell'archeologo, che si potrebbero definire accessorie, poiché non necessariamente è dato che ogni archeologo sia anche un abile fotografo. Ciò è generalmente irrilevante nel contesto di un comune scavo di terra in cui, a meno che non ci si trovi in condizioni particolarmente avverse, le moderne tecnologie (basti pensare agli elevati standard che ormai ha raggiunto anche la più economica delle moderne fotocamere digitali) e la cognizione del lavoro finale da produrre, permettono di ottenere risultati sufficientemente accettabili ed in tempi brevi. Per un contesto subacqueo al contrario aumentano con certezza le difficoltà per eseguire delle buone fotografie per fattori tra i più svariati quali: scarsa visibilità, illuminazione insufficiente che implica l'utilizzo di illuminatori appositi, o correnti sottomarine e, non da ultimo, il fatto di agire in un ambiente che per l'operatore non è quello naturale. Tutto questo fa sì che la soluzione ideale per ogni scavo subacqueo dovrebbe essere quella di poter disporre di almeno un archeologo con abilità fotografiche dal momento che solo lui può sapere cosa e come fotografare e per quale finalità. Nel caso ciò non fosse possibile, è importante che vi sia comunque un fotografo professionista a cui affidare la documentazione fotografica,

[9] GREEN 2004, p. 100.

[10] BOWENS 2009, p. 71.

sempre a patto però che egli sia in perfetta sintonia con l'archeologo, per soddisfare innanzitutto l'esigenza scientifica, dal momento che qualsiasi splendido scatto non mirato a tale fine risulterebbe "archeologicamente inutile".

1. CENNI DI STORIA E TECNICA DELLA FOTOGRAFIA SUBACQUEA

La fotografia, come è noto, è un processo che permette di ottenere una registrazione permanente e statica, in forma di immagine, di un qualsiasi soggetto, proiettato per mezzo di un sistema ottico su un elemento fotosensibile. Il termine, che deriva dal greco *φωτο* (*foto-* = luce) e *γραφία* (*-grafia* = scrittura), letteralmente sta a significare "scrivere con la luce" e con esso si intende la tecnica ma, per estensione, anche l'immagine stessa ed il supporto che la contiene[11].

La macchina fotografica o fotocamera è lo strumento che consente di mettere in atto questo processo, producendo immagini di oggetti reali che - nel caso delle macchine tradizionali o analogiche - sono stampate su idonei supporti cartacei ma con l'avvento delle macchine digitali, da alcuni decenni, sono archiviabili anche su supporti elettronici.

La macchina fotografica è sostanzialmente formata da un corpo con una apertura da un lato, atta a far entrare la luce, secondo il principio della *camera oscura*[12]. La luce passa attraverso una serie di lenti, costituenti l'*obiettivo*, che la focalizzano su di una superficie sensibile: la *pellicola* nel caso della fotografia analogica o il *sensore* nel caso di quella digitale.

Il *diaframma* è l'apertura di dimensione regolabile, incorporata nell'obiettivo, che controlla la quantità di luce che raggiunge la pellicola o il sensore, per tutto il tempo in cui rimane aperto l'*otturatore,* che è il dispositivo meccanico o elettronico che ne determina la durata di apertura: il cosiddetto tempo di esposizione; la *luminosità* corrisponde all'apertura massima del diaframma per cui è stato progettato lo strumento e, di conseguenza, più luminoso sarà un obiettivo, più luce riuscirà a passare richiedendo tempi di esposizione minori.

Il *piano focale* corrisponde al piano, perpendicolare all'asse ottico, posto ad una distanza per la quale una lente forma una immagine nitida, cioè a fuoco; la *lunghezza focale* equivale alla distanza espressa in mm fra la lente convergente, cioè il centro ottico, ed il piano focale (Fig. 1-1).

---

[11] DAVINO, IARDINO, TOSI 2010, p. 26.

[12] La camera oscura consiste in un dispositivo ottico formato da una scatola oscurata provvista di un foro sul fronte, detto stenopeico, e un piano di proiezione dell'immagine sul retro. Cfr. Enciclopedia Treccani online: *www.treccani.it/camera*.

Un obiettivo, per quanto sia costruito in modo sofisticato e preciso, provocherà sempre alterazioni e difetti che dovranno essere adeguatamente trattati in fase di rielaborazione (Fig. 1-3). Essi si distinguono nelle seguenti tipologie:

- l'*aberrazione cromatica* che si determina perché i raggi che compongono la luce hanno diversi colori e diverse lunghezze d'onda; quando attraversano un corpo solido e trasparante quale una lente, subiscono differenti indici di rifrazione, a causa appunto delle diverse lunghezze d'onda e così cadono sul piano a breve distanza l'uno dall'altro, creando una scomposizione, seppur minima, del raggio di luce iniziale, che produce una non perfetta definizione dei colori;
- l'*astigmatismo* che produce uno schiacciamento che fa apparire ovali gli oggetti circolari;
- le *distorsioni*, che possono essere *a barilotto* e *a cuscinetto*, causano una deformazione dell'immagine che subisce una curvatura convessa o concava che dal centro dell'immagine aumenta procedendo verso le estremità, andando quindi ad alterare la forma reale di ciò che viene ripreso[13].

Gli albori della fotografia risalgono agli inizi del XIX secolo, prima con la tecnica eliografica di Joseph N. Niépce del 1826 e poi con la dagherrotipia di Louis Daguerre del 1837; l'idea decisiva si deve però a William H. F. Talbot che nel 1839 mette a punto il processo negativo/positivo con fissazione delle immagini su carta sensibile; George Eastman, nel 1888, brevetta e mette in produzione la prima macchina fotografica con pellicola a rullo, inizialmente in carta ma poi prodotta in celluloide: la fotografia è ormai divenuta un fenomeno commerciale alla portata di tutti. Numerosi progressi si susseguono, come l'invenzione della prima pellicola a colori per il consumo di massa, la *Kodachrome* del 1929, e lo sviluppo di una vasta gamma di obiettivi, dai *fish-eyes* ai teleobiettivi più potenti, che dal 1950 al 1980, apre nuovi orizzonti per la produzione delle immagini fotografiche[14].

La fotografia subacquea ha origine nel 1856, quando l'inglese William Thompson, restando in superficie, esegue il primo scatto subacqueo per mezzo di una macchina posta all'interno di un contenitore stagno e montata su di un tripode ancorato al fondale.

Il biologo francese Louis Boutan, nel 1893, è invece il primo ad eseguire una fotografia in immersione, indossando una attrezzatura da palombaro, con la fotocamera inserita in una custodia di rame resa impermeabile da guarnizioni in caucciù; la macchina fotografica è una *Detective*,

---

[13] Per le caratteristiche delle macchine fotografiche confrontare DAVINO, IARDINO, TOSI 2010 e la voce 'Fotografia' dell'Enciclopedia Treccani online *www.treccani.it*.

[14] Per la storia della fotografia confrontare la voce 'Fotografia' dell'Enciclopedia Treccani online *www.treccani.it*.

costruita appositamente per Scotland Yard e provvista di dieci lastre che, non necessitando di essere sostituite di volta in volta, permettono di eseguire tutti gli scatti durante una singola immersione.

La prima fotografia subacquea a colori risale al 1926, ad opera di William Longley e del fotografo del *National Geographic* Cahrles Martin, con l'utilizzo di lastre a colori *Autocrome*, che sono però caratterizzate da una sensibilità alla luce talmente bassa che per ovviare a ciò, su una barca posta in superficie, viene fatto esplodere ben mezzo chilo di magnesio: quantità sufficiente per illuminare il fondale tanto da permettere la ripresa fotografica.

Tra il 1935 ed il 1937, Antoine Poidebard studiò le strutture appartenenti all'antico porto fenicio della città di Tiro, in Libano; per documentare i blocchi sommersi, dei palombari eseguirono delle fotografie, considerate le prime aventi finalità archeologica nel settore marittimo[15].

Nel 1954 la fotografia subacquea diviene alla portata di tutti con la produzione su scala industriale dello scafandro *Rolleimarin* per la fotocamera *Rolleiflex*, da parte della ditta tedesca Franke&Heidecke in collaborazione con il celebre documentarista austriaco Hans Hass; i tempi di esposizione, l'apertura del diaframma e la messa a fuoco sono facilmente regolabili da alcuni comandi posizionati sullo scafandro che interagiscono con quelli interni della camera. Il macchinario è corredato di un flash a lampadina montato su un lungo braccio per impedire l'effetto nebbia del particellato.

Successivamente il famoso esploratore marino Jacques-Yves Cousteau realizza, insieme a Jean de Wouters, la macchina anfibia *Calypso* studiata per essere utilizzata direttamente sott'acqua, senza necessità di essere scafandrata, distribuita a partire dal 1960 dalla francese *Spirotechnique*. Monta un obiettivo da 35mm ed ha la considerevole profondità operativa di 60 m. Successivamente il disegno viene acquistato dalla *Nikon*, che nel 1963 rilancia il modello come *Nikonos*, che diviene presto la macchina fotografica subacquea più popolare, utilizzata tanto per uso amatoriale quanto professionale. Negli anni vengono studiati vari modelli, sempre più sofisticati, come la *Nikonos RS* del 1992, la prima camera subacquea reflex dotata di autofocus; l'ultima è la *Nikonos V*, prodotta fino al 2001, anno in cui la *Nikon* dichiara di cessarne la costruzione, principalmente a causa del mercato digitale che sta inevitabilmente sopraffacendo l'analogico.

La rivoluzione avviene infatti nel 1981 e si deve all'uscita sul mercato della prima fotocamera digitale: la *Sony Mavica*. Con essa il digitale inaugura il suo fortunato ingresso nel mondo della fotografia grazie alla sostituzione della pellicola con un sensore. Il cuore della macchina digitale si trasforma così in un *chip* elettronico fotosensibile in grado di convertire l'energia luminosa in impulsi elettrici elaborati a loro volta in una immagine che può essere salvata

---

[15] Cfr. POIDEBARD 1939 e BASS 1970, p.82.

su una scheda di memoria[16]. L'innegabile semplificazione e la rapidità del processo digitale collegate ad altri conseguenti vantaggi hanno mutato il panorama dell’universo fotografico in maniera talmente radicale che non si stenta a comprendere come il digitale abbia superato e soppiantato l'analogico. La prima grande possibilità subito percepita, anche da un neofita della fotografia, è sicuramente quella pressoché illimitata di ripetere uno scatto: se i rullini hanno una capienza che può arrivare generalmente alle 24 o 36 pose, una scheda di memoria, in base ai GB di capienza e alla risoluzione alla quale vengono impostate le fotografie, può incamerare centinaia e centinaia di fotogrammi. Inoltre, grazie allo schermo LCD di cui ormai ogni apparecchio è dotato, è possibile verificare in tempo reale l’immagine appena scattata e decidere se tenerla o eliminarla, liberando spazio in memoria e ripetendo lo scatto fino ad ottenere il risultato voluto, mentre con la pellicola tradizionale le fotografie possono essere esaminate solo dopo lo sviluppo, a rullino terminato, con il dubbio della corretta esecuzione dell'opera, soprattutto in un contesto, come quello subacqueo, dove non è possibile tornare con facilità per ripetere il lavoro in caso di errori. E’ evidente il risparmio, anche a livello economico, in quanto con le fotocamere analogiche è sempre necessario acquistare i rullini, calcolandoli in base alla necessità, per poi svilupparli, mentre una scheda di memoria è sempre la medesima, viene svuotata di volta in volta ed è pronta per archiviare altrettante nuove immagini.

Ulteriore vantaggio tecnico, se non il più grande, offerto dalle macchine fotografiche digitali risiede nella possibilità di adeguarsi a differenti condizioni di ripresa. Il *bilanciamento del bianco* consente di tarare la temperatura-colore in modo da poter effettuare riprese in ambienti illuminati da qualsiasi fonte luminosa, senza che risultino dominanti cromatiche, poiché nel momento in cui un apparecchio è in grado di rappresentare con accuratezza il colore bianco, può di conseguenza riprodurre correttamente tutti gli altri colori. Inoltre, mentre le pellicole devono essere scelte a priori con una determinata sensibilità alla luce, espressa in ISO o ASA, a seconda della luminosità dell'ambiente in cui ci si aspetta di dover effettuare gli scatti, i sensori hanno una escursione, più o meno ampia a seconda dei modelli, che può essere impostata di volta in volta, potendo scegliere quella migliore per la situazione. Come è noto ad ogni subacqueo, quando la luce diurna attraversa l’acqua, i colori vengono assorbiti selettivamente all’aumentare della profondità ma, secondo quanto osservato precedentemente, con la fotografia digitale è possibile ripristinare i colori potendo scegliere tra varie soluzioni: con il bilanciamento del bianco in profondità o utilizzando programmi specifici della fotocamera, di cui ormai molti modelli, soprattutto compatti, sono dotati oppure con dei filtri di colore o anche attraverso l’impiego di flash che ricreino il colore dato dalla luce solare.

---

[16] BOWENS 2009, p. 73.

Il formato digitale offre in aggiunta una grande scelta di interventi correttivi in fase di rielaborazione. Tra i più significativi vi sono la correzione dell'esposizione, del contrasto e delle dominanti di colore, l'applicazione di filtri, la possibilità di correggere, raddrizzare o distorcere l'immagine e selezionare e/o ritagliare solo parti di essa, scartando il superfluo. Si aggiunga che la fotocamera, salvando la fotografia direttamente in formato digitale, consente di creare file con diversi tipi di estensione: - RAW, contiene le informazioni dell'immagine originale così come prodotta dal sensore, prima di qualsiasi processo da parte della fotocamera, dunque utile in post-produzione, anche se con lo svantaggio di occupare parecchio spazio per ogni singola foto, risultando pesante per la gestione;

- JPEG, è il più diffuso formato di file per immagine, che permette di comprime l'immagine, con un fattore di 10 o 20 e con una perdita di qualità visivamente minima rispetto all'originale;
- TIFF, è l'alternativa non compressa al JPEG e, a differenza di quest'ultimo, che può supportare immagini solo a 8 bit per canale multilivello, può arrivare fino a 16 bit.

Anche una fotografia prodotta con una camera analogica può essere sottoposta ad una rielaborazione al computer, ma previa digitalizzazione che deve essere inevitabilmente effettuata in un secondo momento e per mezzo di uno scanner ad alta risoluzione, senza il quale tutto ciò non può essere realizzato.

Proseguendo con gli aspetti vantaggiosi della fotocamera digitale, vi è poi la possibilità di impostare la risoluzione alla quale si vuole eseguire la ripresa, definendo a priori la capacità di registrare e riprodurre i dettagli più fini; le camere professionali oggi possono arrivare anche a più di 20 megapixel di risoluzione e dunque si potrà scegliere quella più adeguata, più o meno alta, secondo il tipo di utilizzo a cui sono destinate le fotografie, come la grandezza della stampa che si vorrà produrre, o la grandezza per l'analisi di determinati dettagli, oppure il risparmio di spazio nella scheda di memoria per poter eseguire più scatti (in rapporto alla qualità di riproduzione). Il *pixel*, neologismo derivato da *picture element*, è la più piccola parte in grado di registrare e visualizzare un dettaglio di immagine in un dispositivo di acquisizione, difatti una fotografia digitale può essere fondamentalmente intesa come un mosaico di pixel; ne consegue che il loro numero totale indica la risoluzione dell'immagine e al tempo stesso, in una macchina fotografica, la quantità di pixel di un sensore corrisponde alla densità di informazioni che esso è in grado di catturare.

Infine una funzione estremamente utile, ormai presente in tutte le macchine fotografiche digitali, è quella che permette di eseguire anche riprese video, oggigiorno anche in alta definizione, trasformando all'occorrenza l'apparecchio in una videocamera.

Per concludere, le macchine fotografiche digitali attualmente presenti sul mercato si dividono in quattro categorie:

- *compatte* o *point-and-shoot*, sono le più economiche, di dimensione contenute, caratterizzate da facilità di utilizzo, difatti non avendo bisogno di regolazioni manuali, come suggerisce il nome stesso, l'operatore deve semplicemente "puntare e scattare". L'obiettivo è fisso, ma permette di aumentare lo zoom, e la messa a fuoco è automatica; sono dotate di flash incorporato, monitor LCD e consentono l'esecuzione di brevi filmati. Lo scatto è penalizzato da un ritardo rispetto all'istante in cui viene premuto il pulsante, impedendo quindi di "cogliere l'attimo". Permettono complessivamente buoni risultati, senza regolazioni particolari, con un investimento di costi e tempo contenuto.
- *single-lens reflex*, sono strutturate in modo tale che l'immagine, catturata dall'obiettivo, sia indirizzata ad uno specchio inclinato di 45 gradi verso l'alto, che la invia a sua volta ad un pentaprisma in grado di raddrizzarla (altrimenti avrebbe i lati destro e sinistro invertiti) e che la riflette al mirino, permettendo così al fotografo di inquadrare il soggetto; alle spalle dello specchio si trova l'elemento sensibile e nel momento in cui viene eseguito lo scatto, lo specchio si solleva permettendo alla luce di passare e di impressionare il sensore. Gli obiettivi sono intercambiabili, in base al tipo di fotografia che si vuole eseguire, come nel caso di una fotografia macro piuttosto che una di ambiente; la macchina può essere utilizzata sia completamente in modalità manuale, potendo impostare personalmente la sensibilità del sensore, l'apertura del diaframma ed il tempo di esposizione, sia in modalità semi-manuale o automatica; rispetto alla compatta permette di ottenere fotografie di qualità decisamente più elevata, ma implica buone conoscenze e abilità fotografiche da parte dell'operatore; ha dimensioni sicuramente più ingombranti e, in particolare nei modelli di fascia alta indicati per uso professionale, presenta costi ben più elevati.
- *prosumer* o *full-featured* o *bridge*, possiedono un obiettivo zoom fisso come le compatte, ma di dimensioni e qualità superiori; rispetto a queste sono generalmente più veloci nella memorizzazione dell'immagine e hanno un ritardo minore tra la pressione del tasto e lo scatto effettivo, inoltre hanno la possibilità di essere utilizzate in modalità manuale; le dimensioni e i costi sono leggermente superiori a quelli delle fotocamere compatte.
- *Mirrorless*, sono caratterizzate dalla possibilità di disporre di obiettivi intercambiabili come le reflex, ma si distinguono da queste per l'assenza dello specchio e del pentaprisma, di conseguenza hanno il vantaggio di essere decisamente meno ingombranti e meno pesanti, il mirino inevitabilmente non è del tipo ottico e si deve utilizzare lo schermo LCD; i loro sensori sono paragonabili a quelli utilizzati dalle reflex non professionali; rappresentano un buon compromesso che consente di avere una camera con prestazioni elevate, anche se non eguagliabili alle macchine

reflex, ma più maneggevoli, e sicuramente sono più performanti delle fotocamere compatte o delle bridge, sebbene di ingombro maggiore e di costo più elevato rispetto a quest'ultime.

Attualmente sono disponibili anche numerosi scafandri, di varie case produttrici, per impermeabilizzare molti dei modelli di fotocamere appartenenti alle tipologie precedentemente descritte. Possono essere costruiti in materiale plastico trasparente (policarbonato) o in alluminio anodizzato, in genere, ma non sempre, rispettivamente per le fotocamere compatte e per le reflex. Tali scafandri permettono di regolare la fotocamera in immersione attraverso dei pulsanti che agiscono meccanicamente su quelli della macchina; alcune case produttrici hanno studiato invece, per le camere più sofisticate, scafandri con pulsantiere elettroniche a controllo remoto, posizionate ai lati della macchina sulle impugnature, sostenendo che i pulsanti a contatti bagnati non risentono della pressione idrostatica, consentendo profondità operative maggiori, e riducono la quantità di fori sullo scafandro, eliminando possibili vie di infiltrazione per l'acqua. Per le macchine fotografiche aventi obiettivi intercambiabili è solitamente previsto che si possa scegliere se montare, sullo scafandro, un oblò piano o un oblò sferico: in genere il primo è indicato per eseguire fotografie macro, mentre il secondo, che mantiene inalterato l’angolo di campo delle ottiche, viene utilizzato per fotografie d’ambiente (Fig. 1-5) .

Quasi tutti i modelli sono dotati di *presa sincro* per collegare eventuali flash esterni, il cui compito consiste nel restituire colori reali al soggetto e bilanciare la luminosità quando la luce naturale non è sufficiente. Le caratteristiche principali dei flash sono: la potenza, espressa in Watt/sec., che convenzionalmente si riferisce al *Numero Guida* "*NG*", che indica il valore massimo di apertura del diaframma per un soggetto da illuminare posto a 1m dal piano focale e con l'ampiezza di emissione, quindi conoscendo l'angolo di campo dell'obiettivo è possibile valutare se il flash è sufficiente per illuminare l'intera scena inquadrata; la temperatura della luce, anche detta temperatura di colore, espressa in gradi Kelvin, influisce sulla restituzione delle dominanti variando generalmente da 4200°K a 5700°K, offrendo dominanti più calde per i valori più bassi, e dominanti più fredde per quelli più alti. Altre caratteristiche possono essere il tempo di ricarica ed il numero massimo di lampi effettuabili. I flash si distinguono in integrati alla fotocamera, detti *built in*, o esterni, ed in manuali o automatici, detti *TTL* (esposizione automatica *Trough The Lens*); in ambito subacqueo è sicuramente preferibile un flash esterno poiché permette di essere posizionato in modo tale da offrire una illuminazione laterale del soggetto per ridurre il possibile "effetto neve": le particelle di sospensione quando vengono illuminate da un flash riflettono la luce come uno specchio, di conseguenza una illuminazione diretta viene reindirizzata direttamente verso la

fotocamera, riportando una fastidiosa punteggiatura bianca sulla fotografia così eseguita, mentre illuminando lateralmente il soggetto, queste rifletteranno la luce con la stessa angolazione, e solo una minima parte sarà diretta verso l'obiettivo, garantendo in questo modo un risultato migliore (Fig. 1-6).

2. IL FOTOMOSAICO

La tecnica denominata fotomosaico si effettua per sviluppare una ricostruzione generale e descrittiva di un sito attraverso l'unione di più fotogrammi.

Dal momento che la frequente mancanza di visibilità in un contesto subacqueo e/o le dimensioni del sito stesso non permettono, nella generalità dei casi, di effettuare una foto di insieme dell'area interessata, ovviare a ciò è possibile solo scattando una serie di fotografie consequenziali che, sovrapposte e poi unite o fuse, in un secondo momento, formino un mosaico del sito che consenta di ritrarlo nella sua totalità o in una sua porzione specifica[17].

Vi è però un aspetto problematico: a meno che le operazioni non vengano realizzate su una superficie piana, quali un pavimento o la facciata di un palazzo, le diverse altezze degli oggetti e delle strutture del sito stesso comporteranno inevitabili distorsioni prospettiche nelle immagini fotografiche. Ne consegue che il fotomosaico classico non potrà mai offrire una ricostruzione metrica: ovvero che da esso non sarà possibile ricavare una restituzione planialtimetrica in scala. Di conseguenza quale unico metodo di documentazione, se non abbinato ad un rilievo tridimensionale, risulterebbe insufficiente in uno scavo archeologico che voglia essere affrontato con tutti i crismi; non è escluso comunque che possa costituire una soluzione ragionevole in situazioni in cui non si disponga di tempo o di fondi adeguati per mettere in atto una metodologia più complessa, a patto però che ricorrano alcune condizioni, ovvero che sia supportato da misurazioni adeguate del sito e dei reperti in esso presenti, che il sito sia disposto su di un fondale pressoché piatto e sia privo di elementi verticali di dimensioni considerevoli[18]. Questo potrebbe essere il caso di un carico, come quello presente nel sito *Punta Scifo D*, costituito esclusivamente da reperti di grandi dimensioni quali sono dei blocchi lapidei, oltretutto di forma squadrata, privi di una certa tipologia di dettagli adagianti su un fondale pianeggiante, mentre non potrebbe essere proponibile per un relitto, come quello del *Mercurio* che, con uno scafo in cui abbondano i particolari degli elementi costruttivi, delle attrezzature e degli equipaggiamenti, comporterebbe un grado molto elevato di precisione metrica e di dettaglio.

Date tali premesse, tre sono i requisiti necessari per ottenere un fotomosaico corretto:

---

[17] BOWENS 2009, p. 78.

[18] DEAN et alii 1992, p. 192.

- i punti da cui si effettuano gli scatti devono essere tutti su di uno stesso piano, denominato piano di ripresa;
- l'asse ottico dell'obiettivo deve risultare perpendicolare a detto piano;
- ogni foto deve essere eseguita in modo tale che presenti ampi margini di sovrapposizione rispetto a quelle adiacenti[19].

Una procedura preziosa, per ottenere l'accurata fusione delle foto, consiste nel far sì che la loro sovrapposizione arrivi al 50% circa. Può rivelarsi infatti molto utile ritagliare e scartare le parti più esterne delle fotografie ottenute, che sono quelle più soggette a distorsioni, lavorando solo con le parti centrali (anche per questo è importante che le immagini arrivino a sovrapporsi fino al 50%, così che - se necessario - una percentuale anche considerevole possa essere tranquillamente eliminata)[20].

Fin dalla prima edizione, edita nel 1992, del manuale dalla *Nautical Archaeology Society*, alla sezione dedicata alle tecniche di rilevamento, non poteva mancare un capitolo riservato al fotomosaico[21]. In esso viene spiegato come per calcolare l'altezza (h) della camera, espressa in metri, e la lunghezza focale (f) della lente, espressa in millimetri[22], si può applicare la seguente proporzione in cui queste due misure sono messe in rapporto rispettivamente con la lunghezza della porzione di piano (L), espressa in metri, che si vuole coprire con ogni scatto, e la larghezza della pellicola (W), espressa in millimetri (Fig. 2-1)[23]:

$$\frac{L}{h} = \frac{W}{f}$$

[19] GREEN 2004, p. 168-182.

[20] BOWENS 2009, p. 79.

[21] DEAN et alii 1992, pp. 189-192.

[22] La lunghezza focale corrisponde alla distanza in mm tra il centro ottico dell'obiettivo ed il piano pellicola o sensore, alla quale viene messa a fuoco l'immagine di un punto posto all'infinito.

[23] I valori della lunghezza (L) della porzione di piano, e dell'altezza (h), sono stati così denominati in questo paragrafo per allinearsi a quanto scritto successivamente e non creare confusione, in quanto nel testo originale della *NAS* sono invece rispettivamente indicati come (D) ed (H) (DEAN et alii 1992, p. 189).

Nelle macchine fotografiche digitali, il sensore, che è l'equivalente della pellicola di una fotocamera analogica, consiste in un dispositivo elettronico fotosensibile che ha il compito di convertire una immagine ottica in immagine digitale, con cui è possibile il suo successivo immagazzinamento su un supporto di memoria.

E' da considerare però che la lunghezza focale (f), che le case produttrici dichiarano per ogni obiettivo, è uniformata alla grandezza della pellicola analogica standard di 36x24 mm, denominata correntemente 35 mm, e corrispondente al sensore *Full Frame* digitale, detto in italiano a 'pieno formato' e montato attualmente solo sui modelli professionali. Per ridurre i costi e rendere i prodotti più accessibili al vasto pubblico, la maggior parte delle fotocamere digitali monta sensori di dimensioni più piccole (Fig 2-2).

Sapendo che il *fattore di crop* (c) tradotto in italiano con 'fattore di ritaglio' o 'moltiplicatore di focale', indica il rapporto fra la diagonale di un sensore di dimensioni inferiori e la diagonale di un tradizionale formato 35 mm *Full Frame*, per calcolare la lunghezza focale effettiva, è necessario moltiplicare la lunghezza focale dichiarata per il *fattore di crop* secondo la seguente formula:

$$f_{\text{effettiva}} = f \cdot c$$

Inoltre poiché il procedimento del fotomosaico viene svolto in immersione, è indispensabile che la lunghezza focale (f), utilizzata nei vari calcoli presentati precedentemente, sia moltiplicata anche per l'indice di rifrazione dell'acqua (n), equivalente a circa 1.33[24]. Questo perché, secondo il consueto utilizzo del macchinario, i valori riportati dalla casa produttrice sull'obiettivo sono ponderati in base all'ambiente aereo. Ne consegue:

$$f_{\text{effettiva in acqua}} = f \cdot c \cdot n$$

Per calcolare matematicamente gli intervalli da adottare, mettendo in conto una certa sovrapposizione tra le fotografie, si devono considerare sia l'altezza (h) dalla quale esse vengono scattate, sia l'obiettivo utilizzato sulla macchina. Questo determina infatti l'angolo di campo (α) relativo al lato maggiore del fotogramma, tenendo presente la riduzione di quest'ultimo per effetto

[24] L'indice di rifrazione dell'acqua corrisponde a 1,333 ad una temperatura di 20 °C.

della rifrazione (Fig.2-3)[25]. Si deve quindi calcolare la lunghezza del lato maggiore (L) del rettangolo di ripresa, secondo la formula:

$$L = \frac{2h \cdot tg\alpha}{2}$$

ricordando che, in alternativa, sarà possibile ricavare il dato con il sistema grafico. Posto che la porzione di sormonto sia di 1/4 di fotogramma, come generalmente suggerito, la distanza (D) tra una strisciata fotografica e quella adiacente, potrà essere ricavata nel seguente modo:

$$D = \frac{3L}{4}$$

Infine la distanza (d) tra uno scatto e quello successivo, all'interno della stessa strisciata, sarà in rapporto al lato minore del rettangolo di ripresa, e di conseguenza si avrà:

$$d = \frac{2D}{3}$$

Nel tempo, varie sono state le tecnologie utilizzate e sperimentate per realizzare fotomosaici archeologici subacquei.

Probabilmente il primo ad impiegare questa tecnica per documentare alcuni relitti affondati nel Mediterraneo fu, agli inizi del 1950, l'ingegnere francese Dimitri Rebikoff, esperto di fotografia subacquea. A partire dalla tecnologia a disposizione in quegli anni, e coadiuvato da Alexandre Ivanoff dell'Università di Parigi, egli arrivò a costruire una macchina fotografica con un sistema di lenti apposite, abbinata ad un flash elettronico o a una luce stroboscopica, montata su di un *Pegasus*, anch'esso di sua invenzione. Nacque così il primo veicolo subacqueo monoposto, con la possibilità di essere attrezzato con macchina fotografica, relativi illuminatori, giroscopio direzionale nonché strumenti per misurare profondità e inclinazione (Fig 2-4)[26]. Altra tecnica sviluppata in seguito dallo stesso Rebikoff, e adottata nel 1965 nel porto sommerso di Kenchreai in Grecia,

[25] ROSSO 1997, pp. 133-134.
[26] REBIKOFF 1972, p. 184.

prevedeva che in caso di acqua particolarmente limpida, ed in presenza di un mare piatto, fosse possibile montare in assetto verticale una camera ad impulsi, tra due semplici scafi di catamarano usati come galleggianti, trascinati da una imbarcazione che procedeva ad una velocità costante; la fotocamera era programmata per scattare foto in sequenza sulla rotta percorsa ad una velocità di 10 ft (= 3m circa) al secondo[27].

Nel 1957, quasi contemporaneamente ai primi esperimenti di Rebikoff, fu realizzato da Philippe Tailliez il fotomosaico del relitto romano *Titan* del I secolo a.C., situato nelle acque dell'Isola del Levante[28]; attaccando una livella a bolla ed un filo a piombo alla macchina fotografica, l'operatore aveva la possibilità di eseguire gli scatti nuotando sempre alla stessa distanza dal fondo e mantenendo l'apparecchio costantemente perpendicolare ad esso, rendendo così la qualità del risultato inevitabilmente dipendete dalle abilità natatorie del subacqueo e dalle condizioni ambientali. Paline graduate erano state opportunamente posizionate orizzontalmente sul sito per permettere di sviluppare degli ingrandimenti dei negativi in modo da far risultare le fotografie tutte con la stessa scala.

Tra il 1958 ed il 1959, l'archeologo Nino Lamboglia, coadiuvato per le operazioni subacquee dal giornalista fotografo Gianni Roghi, dirige lo scavo sul relitto romano datato tra il 120 ed il 100 a.C., affondato presso Spargi, isola nel nord della Sardegna: una griglia morbida ottenuta tirando delle cime di colore giallo, tenute in tensione legandole a dei pali infissi nel fondale, suddivide l'area in quadranti di 2 x 2 metri ognuno dei quali viene fotografato con una distanza di ripresa non superiore ai 3 metri per evitare la perdita di dettagli importanti[29]. La qualità del rilievo fotografico è ancora affidata alle abilità natatorie di chi lo esegue, e lo stesso Roghi affermerà che a suo giudizio una mappatura fotografica è l'impresa più ardua da realizzare per un operatore subacqueo, in particolare se ostacolato da una forte corrente marina.

Decisivo sia per quanto riguarda la conduzione di uno scavo sottomarino sia per l'avanzamento delle tecniche di mappatura fotografica, fu il caso dello scavo del relitto Bizantino di VII secolo presso l'isolotto di Yassi Ada, in Turchia, tra il 1961 ed il 1964 ad opera dell'archeologo George Bass, avente inoltre il merito di essere riconosciuto come il primo archeologo subacqueo[30].

---

[27] REBIKOFF 1972, p. 185.

[28] Tailliez viene indicato da Bass come il primo ad aver impiegato la tecnica del fotomosaico applicata ad un contesto subacqueo, ma probabilmente fu Rebikoff solo il primo a metterla in atto: cfr. BASS 1970, p.99-100; REBIKOFF 1972, p.184; GIANFROTTA, POMEY 1980, pp. 111-112.

[29] ROGHI 1959.

[30] Per quanto riguarda la tecnica utilizzata per la realizzazione del fotomosaico cfr. BASS 1970, pp. 100-104, mentre per approfondire la conduzione completa dello scavo cfr. BASS 1970, pp. 132-150 e BASS, VAN DOORNINCK 1982, pp. 9-31.

La tecnica di suddividere l'area in quadranti viene ripresa e perfezionata: viene costruito un telaio rigido costituito da 9 rettangoli metallici si 6 x 2 metri, disposti come una gradinata seguendo l'andatura inclinata del fondale su cui giace il relitto; ogni rettangolo viene livellato per essere posto correttamente in piano, e a sua volta è suddiviso in 3 quadrati di 2 x 2 metri con delle corde elastiche ben tese, per un totale di 27 quadranti. Due torri fotografiche in metallo leggero, ed aventi anch'esse base di 2 x 2 metri, vengono erette e adagiate sopra i quadrati, al fine di poter essere facilmente spostati su ognuno di essi; l'elevato grado di trasparenza dell'acqua in questa zona permette che le torri siano costruite dell'altezza di ben 4 metri ognuna (Fig. 2-5). Gli scatti fotografici sono così eseguiti su di una piattaforma solida, risultando di eccellente qualità. La produzione di un fotomosaico risulta però difficoltosa a causa della pendenza del fondale non parallelo al piano di ripresa: i singoli reperti, giacendo dunque a profondità diverse, necessitano di una rielaborazione per mezzo di un correttore ottico al fine di essere riprodotti tutti con una unica scala di misura; per tale operazione è necessario disporre delle quote di ognuno di essi, preventivamente annotate facendo pendere come un filo a piombo, dal piano orizzontale del telaio, una cordella metrica. Inoltre, in ogni scatto, gli unici reperti rappresentati in corretta relazione con la griglia sovrastante sono quelli ripresi al centro del fotogramma, obbligando quindi a ridisegnare ogni fotografia con gli oggetti giustamente riposizionati sia rispetto all'altezza del telaio, sia rispetto al centro di esso. Di conseguenza, pur avendo trovato la soluzione per realizzare delle fotografie di qualità elevata, la presente tecnica applicata in questo contesto implicava dei tempi di rielaborazione decisamente troppo elevati, imponendo nelle campagne successive di trovare una soluzione alternativa, necessità che portò Bass a studiare e ad applicare la prima tecnica fotogrammetrica su di un sito sottomarino (Cfr. § 3).

All'ingegnere Alessandro Fioravanti, è generalmente attribuita la progettazione e realizzazione (senza averla brevettata) della 'fotorotaia' (Fig. 2-6). In realtà, pur avendola impiegata a partire dai primi anni '70 per lo studio dell'insediamento palafitticolo villanoviano del 'Gran Carro' nel lago di Bolsena, egli stesso scrive che la struttura in questione era stata utilizzata da George Bass in occasione dei suoi scavi presso Yassi Ada, nonostante l'archeologo americano non faccia mai riferimento a questo tipo di struttura nei suoi lavori[31]. Concepita per produrre un rilievo fotogrammetrico (cfr. § 3) grazie alle condizioni di ripresa permetteva di creare un fotomosaico del

[31] Sulla controversia relativa all'invenzione della 'fotorotaia' cfr. *http://www.alessandrofioravanti.it/biografia/* (Copyright 2010 Alessandro Fioravanti), e PICOZZI 1984, p.142, per l'attribuzione della suddetta a Fioravanti; per quanto riguarda invece l'attribuzione a Bass cfr. FIORAVANTI 1989, p. 79.; infine cfr. BASS 1970, p. 100-109, in cui non vi è menzione alcuna di questa struttura.

sito nella fase preliminare di rielaborazione degli scatti[32]. Era formata da un rigido traliccio metallico al quale, nella parte inferiore, era agganciata una rotaia con installata una macchina fotografica, mentre nella parte superiore, era fissato un tubo in PVC riempito di polistirolo espanso che aveva il compito di garantire galleggiabilità a tutta la struttura, mantenendola in posizione in quanto le due aste tubolari alle estremità, che fungevano da gambe di appoggio, erano ancorate a una coppia di corpi morti posizionati sul fondale. Il sistema offriva la possibilità si scattare una serie di foto disposte secondo un asse rettilineo (strisciata) e l'intervallo tra gli scatti, fissato a 60 cm l'uno dall'altro, era facilmente misurabile grazie ad una scala graduata presente lungo la rotaia. Al termine di ogni strisciata era possibile sganciare la struttura e assicurarla nuovamente ad un'altra coppia di corpi morti precedentemente posizionati sul fondale secondo uno schema preciso: ogni serie di foto doveva infatti essere scattata a 70 cm di distanza rispetto alla successione adiacente. Fioravanti consigliava di realizzare i fotogrammi in modo che ognuno si sovrapponesse al precedente per circa il 60%, mentre ogni strisciata per circa il 30% rispetto a quella contigua. Per la realizzazione del fotomosaico si dovevano utilizzare soltanto le parti centrali delle fotografie, poiché meno deformate e corrispondenti a circa 1/3 dell'immagine totale.

In seguito, presso l'Isola d'Elba, Fioravanti decise di sperimentare l'uso di una tecnica completamente diversa, per rilevare il relitto di nave romana, sito nel golfo di Procchio. Data la scarsa profondità - solo 1,5 m circa - alla quale esso giace[33], fu sufficiente immergere solamente l'obiettivo della macchina fotografica, con l'operatore che procedeva in superficie lungo una sagola mantenuta tesa grazie a due gavitelli. Essendo la distanza così ravvicinata, la porzione di sito compresa in ogni fotogramma risultò modesta, per tale motivo gli scatti furono effettuati ogni 50 cm e le strisciate a soli 60 cm l'una dall'altra; complessivamente furono prodotti 265 fotogrammi e per il fotomosaico ne furono impiegati 227.

Jeremy Green, all'interno del suo manuale tecnico di archeologia marittima pubblicato nel 1990, presenta la tecnica del fotomosaico descrivendola come un compromesso per ottenere una visione generale dell'area di scavo, poiché essa sarà inevitabilmente soggetta a delle imprecisioni, per quanto minime, dovute ad esempio ad una qualsiasi variazione verticale del fondale o a una inclinazione o oscillazione della camera fotografica[34]. Ciò nonostante è possibile produrre dei fotomosaici di qualità ampiamente accettabili, tenendo in considerazione il concetto secondo il quale in ogni scatto debbano comparire dei riferimenti bidimensionali per consentire poi una accurata unione dei fotogrammi e apportare le dovute correzioni: in merito Green propone tre

[32] FIORAVANTI 1974, pp. 84-86.
[33] FIORAVANTI 1989, p. 79.

[34] Per il capitolo di Green riguardante il fotomosaico cfr. GREEN 1990, pp. 103-115.

opzioni adottabili per soddisfare tale necessità. La prima prevede la stesura, al di sopra del sito, di un innovativo sistema di cime colorate parallele, graduate ad intervalli regolari; poi l'operatore scatta le foto nuotando liberamente, ma ad una altezza che dovrà mantenere costante con l'assetto. Le foto possono essere eseguite in modo tale che in ognuna di esse rientrino due linee guida quasi al limite dei margini, rispettivamente una a sinistra e una a destra, in modo che se ci dovesse essere un errore di inclinazione della macchina da parte del fotografo, una delle due uscirebbe dal campo ripreso e sarebbe quindi facilmente individuabile; un'alternativa potrebbe essere quella di far rientrare nel piano ripreso tre linee guida, mantenendo lo stesso criterio, ma con il vantaggio di avere quella centrale che funge da riferimento per l'operatore. Altezza e distanza tra una cima e l'altra potranno essere calcolate utilizzando formule del tipo analizzato in precedenza, ponderandole in base alla soluzione che si vuole adottare, cioè se inglobare nel fotogramma due o tre linee guida, e soprattutto in base al grado di trasparenza dell'acqua. Green calcola che questa tecnica in assetto libero, sul campo, richieda solo il 10% circa del tempo che verrebbe speso per realizzare il fotomosaico con una torre fotografica; in compenso però implica un lungo periodo da dedicare alla correzione delle foto, che dovranno inevitabilmente essere raddrizzate. Per tale fase di lavoro, scrivendo in anni in cui si utilizzava ancora la fotografia analogica, Green propone l'utilizzo del tavolo per il raddrizzamento fotografico, un macchinario dotato di un piano su cui appoggiare la fotografia, con la possibilità di essere inclinato e rotato, in modo che, fotografandola perpendicolarmente, vengano compensati gli errori di distorsione dello scatto originale; oggi queste correzioni possono essere più semplicemente eseguite tramite un software di elaborazione di immagini digitali, quale ad esempio *Adobe Photoshop*. Il secondo metodo presentato da Green per la realizzazione di un fotomosaico, ripropone l'utilizzo di un telaio rigido graduato con la camera montata su di una torre fotografica, rifacendosi alla tecnica usata da Geroge Bass per lo scavo del relitto di VII secolo di Yassi Ada. La torre descritta da Green è costituita da una barra trasversale, a cui è fissata la macchina fotografica in modo che risulti perpendicolare al fondale (Fig. 2-7). Alle estremità della barra sono poste quattro gambe che si collegano ai quattro vertici di un telaio quadrato graduato da appoggiare sul fondale, allo scopo di delimitare l'area da catturare in ogni fotogramma. L'altezza delle gambe (volontariamente non regolabili per permettere di ottenere una struttura rigida, costruita su misura) è quindi proporzionale alla grandezza del quadrato e alla lunghezza focale dell'obiettivo. Il telaio, che si appoggia direttamene sul fondale, conferisce robustezza e stabilità tali da contribuire a ridurre ulteriormente gli errori che potrebbero essere causati da minime inclinazioni strutturali di un telaio costruito a bolla o di un bipiede non perfettamente controbilanciato; in questo modo vengono ridotti sensibilmente i tempi di ritocco da apportare in seguito ai singoli fotogrammi. I limiti di tale tipologia di struttura risiedono

innanzitutto nel fatto che può essere utilizzata solo su fondali perfettamente piatti o privi di elementi verticali, che altrimenti ne impedirebbero la posa in piano, e nella sua scarsa manovrabilità, richiedendo l'impiego di almeno due subacquei. Infine la terza tecnica proposta da Green prevede la realizzazione di un fotomosaico attraverso uno dei metodi precedentemente descritti, affiancandola all'utilizzo di un software che ne consente una corretta scalatura. Sul sito vengono infatti individuati dei così detti "punti di controllo", che dovranno essere poi facilmente visibili anche nel fotomosaico, e di questi vengono prese le misure tra uno e l'altro; i dati ottenuti vengono quindi inseriti nel software che li rielabora, creando una rete di tutte le distanze tra questi punti: da questa è possibile mettere in scala tra loro i reperti all'interno delle varie fotografie e di conseguenza l'intero mosaico. Il software[35] al quale si riferisce Green nel suo manuale, sviluppato insieme a Karen Atkinson e Alec Duncan, è da considerarsi ormai obsoleto, ma la logica con la quale lavora è la stessa alla base di programmi attualmente utilizzati per la produzione di rilievi archeologici, quali ad esempio *Site Recorder 3H Consulting*[36] elaborato da Peter Holt.

Nel 2002 gli archeologi inglesi Colin ed Edward Martin hanno presentato le potenzialità di realizzazione di un fotomosaico subacqueo sfruttando il software *Adobe Photoshop* per la correzione dei fotogrammi ottenuti[37]. Per eseguire le fotografie propongono l'impiego di un bipiede autosostenuto (Fig. 2-8) costituito da una barra trasversale e due gambe di lunghezza regolabile, le cui estremità sono ricoperte da neoprene per evitare danni al sito archeologico sul quale vengono puntate. La fotocamera è montata al centro della barra trasversale, fissata su una piastra di plastica rigida, in modo che sia perfettamente perpendicolare al fondale, con vicino una livella a bolla a doppia angolazione per mantenere l'inclinazione corretta. L'obiettivo montato ha lunghezza focale di 20 mm e la macchina è posizionata ad una altezza di m 1,5 allo scopo di coprire una superficie di 1 m. Il bipiede è autosostenuto da piombi attaccati alle estremità delle gambe e ai due galleggianti posizionati sulla parte alta, in modo che le spinte si controbilancino. La struttura è così facilmente gestibile da un solo subacqueo, che può autonomamente scattare le foto e riposizionarla dove necessario per la strisciata successiva. Gli autori consigliano di delimitare il perimetro del sito con un telaio quadrato, suddiviso al suo interno da griglie anch'esse quadrate, delle dimensioni di 1 m. per lato; ai quattro vertici di ognuna di esse suggeriscono di posizionare delle targhette bianche triangolari, con all'interno un triangolo nero più piccolo che indichi l'orientamento della struttura. Le foto dovranno essere eseguite in modo che ogni fotogramma inglobi una di queste griglie, in

[35] Per approfondimenti consultare ATKINSON, DUNCAN, GREEN 1988 e ATKINSON, GREEN, HARPER, INTAKOSAI 1989.

[36] *http://www.3hconsulting.com*

[37] MARTIN C, MARTIN E. 2002, pp.138-147.

successione, spostando di volta in volta il bipiede a cavallo di quella interessata. Trasportando in seguito le foto sul computer, sarà possibile correggerle con il programma *Adobe Photoshop*: ognuna di esse prima di tutto sarà ritagliata vicino alla griglia, in modo da eliminare le parti esterne, superflue e sicuramente distorte; poi sarà ruotata, in modo da far risultare giustamente orientati i triangoli di riferimento ai vertici; infine sarà possibile ritagliare ulteriormente il fotogramma ponendo gli angoli della selezione sui quattro triangoli, in modo da produrre una nuova immagine quadrata. A questo punto sarà necessario raddrizzare correttamente l'immagine, azzerando le inclinazioni, come se fosse esattamente in piano, vista perpendicolarmente: operazione possibile tramite il comando 'Modifica>Trasforma>Distorci'. Con il comando 'Immagine>Dimensione Immagine' sarà opportuno riassegnarle la forma quadrata come nella realtà. Le immagini così ottenute saranno pronte per essere assemblate, montandole nella sequenza corretta, aggiungendole di volta in volta su un *layer* differente e poi, con le opportune accortezze nell'accostarle, fondendole insieme fino ad ottenere il fotomosaico finale. Per conferire un aspetto unitario sarà possibile bilanciare il contrasto, la luminosità e i colori attraverso i comandi 'Immagine>Adjustments> Luminosità/Contrasto' e 'Immagine>Adjustments>Livelli'. Utilizzando solo le parti centrali dei fotogrammi, le distorsioni risulteranno tollerabili, ma ovviamente non sarà possibile eliminarle del tutto. Se il lavoro avrà finalità puramente illustrative, come per una pubblicazione, sarà possibile utilizzare i comandi 'Strumento Sfoca/Contrasta/Sfumino' o 'Strumento Scherma/Brucia/Spugna' per sfumare e meglio uniformare i bordi delle immagini unite. Al contrario, se dovrà risultare il più fedele possibile alla realtà, anche a discapito dell'estetica, gli autori consigliano di evitare l'utilizzo dei comandi precedentemente citati; sarà invece opportuno disegnare su un lato dell'immagine una barra graduata indicante l'unità di misura, per fornire la scala metrica del fotomosaico, a cui in questo caso sarà facile risalire grazie alla lunghezze di 1 m. dei lati delle griglie, sulle quali sono stati ritagliati i fotogrammi.

Nel 2011 Bruce Hartzler ha curato la realizzazione del fotomosaico del relitto di IV secolo a.C. di Mazotos, a Cipro, utilizzando la tecnica delle linee guida disposte sul fondale con cime parallele e fotografo in assetto libero, affiancandola alle tecniche digitali più moderne[38]. Hartzler nell'introdurre il lavoro specifica che sul campo sono stati impiegati materiali e tecnologie non eccessivamente costosi e per la rielaborazione a computer ci si è avvalsi di software gratuiti o facilmente reperibili, con il risultato di un fotomosaico di qualità accettabili - ottenuto in tempi molto buoni - utilizzabile sia come documentazione per l'elaborazione dei dati archeologici, sia per le pubblicazioni. Entrando nello specifico, spiega che sul sito sono state posizionate tre cime

---

[38] DEMESTICHA 2011, pp. 39-59.

parallele di colore bianco, orientandole sul lato lungo, ad una distanza di 5 m l'una dall'altra. L'operatore, nuotando ad una altezza costante di 2 m circa dal relitto, progrediva eseguendo le fotografie con una distanza di circa 1 m dallo scatto precedente, per produrre una sovrapposizione corrispondente al 50% circa dei fotogrammi. Le strisciate fotografiche sono state concepite in modo tale che, nella prima, la cima n° 1 risultasse sul lato sinistro dell'inquadratura, nella seconda fosse in posizione centrale e nella terza sul lato di destra; questo sistema ha prodotto un totale di sette strisciate, realizzate durante una unica immersione, con un tempo di operatività sul fondo di 20 minuti.

E' poi seguito il processo di rielaborazione digitale. Dopo aver rinominato tutte le fotografie secondo la sequenza corretta, queste sono state modificate con *Adobe Photoshop* per garantire uniformità di colore e di luminosità, utilizzando rispettivamente i comandi 'Bilanciamento colore' e 'Luminosità/contrato'; in seguito con il comando 'Match Color>Neutralize' è stato possibile rimuovere il tono di colore blu predominante, tipico delle fotografie subacquee realizzate con sistemi di illuminazione non professionali. Per il mosaico finale, le immagini sono poi state elaborate con il programma gratuito open-source *Hugin*[39]: un software che generalmente viene impiegato per comporre panorami a 360°, ma che con le dovute accortezze può essere utilizzato anche per produrre una immagine piatta. Spiega Hartzler che, per ogni coppia di fotogrammi da sovrapporre, si deve creare un minimo di dieci 'punti di controllo', ossia dei punti in comune tra i due (da questo la necessità di realizzare le fotografie con un grado di sovrapposizione del 50% circa). L'operazione può essere effettuata automaticamente da programmi ausiliari che interagiscono con *Hugin*, quali *Autopano-Sift*[40], oppure manualmente e direttamente con il programma stesso. Con la funzione 'Ottimizzazione' si possono modificare i singoli parametri delle immagini, al fine di correggere la rotazione, l'asse o la scalatura, per determinare la migliore sovrapposizione. Procedendo con la fusione, dal momento che l'oggetto risulta visualizzato da due o più punti di vista, poiché presente contemporaneamente in due o più fotogrammi adiacenti, si prospetta inevitabilmente il problema degli errori di parallasse. Per far fronte a tale inconveniente l'autore utilizza tre diversi algoritmi nell'unione delle varie coppie di foto: *Enblend*[41], *Smartblend*[42] e *Adobe Photoshop CS3'S auto-blend function*. I vari risultati vengono poi importati in *Adobe Photoshop*, dove si sceglie la fusione migliore per ogni coppia data dai tre programmi distinti e da questa

[39] *http://hugin.sourceforge.net/*

[40] *http://user.cs.tu-berlin.de/~nowozin/autopano-sift/*

[41] *http://enblend.sourceforge.net/*

[42] *http://wiki.panotools.org/SmartBlend*

selezione. Montando su *layer* differenti le varie immagini, si può produrre il fotomosaico definitivo: in tal modo è stato completato quello del relitto di Mazotos (Fig. 2-9).

Problemi di errore di inclinazione, distorsione o parallasse, anche se in quantità ridotta, è inevitabile che si presentino, seguendo in particolare questa metodologia che presuppone che il fotografo stia in assetto libero. Anche la minima variazione della pendenza del fondale, una depressione o un rilievo in esso presenti, un possibile sviluppo verticale del soggetto fotografato o una leggerissima inclinazione della macchina, producono una distorsione prospettica che impedirà una sovrapposizione perfetta dei fotogrammi. Prendendo semplicemente ad esempio il caso di una leggera inclinazione, si riuscirà a combinare una coppia di immagini superando gli errori di parallasse, ma già risulterà più complicato unire la successiva coppia alla perfezione. Ciò si traduce nel fatto che inevitabilmente si dovrà scendere a dei compromessi. Molto dipenderà da fattori contingenti insiti di volta in volta in ogni missione. Questa ultima metodologia presentata potrà essere più vantaggiosa in uno scavo archeologico in cui vi sia la necessità di ridurre i tempi di immersione e le ore spese sul campo, preferendo lavorare più distesamente sulla correzione dei singoli fotogrammi.

Attualmente, nell'ambito della realizzazione di fotomosaici, una valida alternativa alla fotografia digitale può essere offerta dalla video ripresa digitale, come anche suggerito dal manuale tecnico della *Nautical Archaeology Society*[43]. Ogni strisciata, effettuata con un'unica ripresa, attraverso i programmi specifici di 'video editing', in un secondo momento può essere suddivisa in più fotogrammi, avendo così la possibilità di estrapolare i migliori. I video possono essere realizzati sia da un operatore in assetto libero, sia da un operatore che utilizza la camera montata su una struttura del tipo di quelle analizzate in precedenza per la fotografia, preferibilmente munita di una rotaia, che ponga la macchina in assetto perpendicolare rispetto al fondale. Una soluzione che unisca i vantaggi di un cameraman in assetto libero offrendogli i benefici di un macchinario che lo aiuti a mantenere la stessa quota ed inclinazione, è quella che monta la videocamera sulla testa di un moderno DPV (*Diver Propulsion Vehicle*) più comunemente detto *scooter subacqueo*, in modo tale che risulti perpendicolare al fondale (Fig. 2-10).

Per terminare il panorama delle possibilità, nel caso di finanziamenti sufficienti, una ulteriore opzione può essere quella rappresentata dall'utilizzo di un ROV (*Remotely Operated Vehicle*) sul quale installare una videocamera in grado di inquadrare perpendicolarmente il fondale, montandola - per fare degli esempi - sul ventre del macchinario o sul muso oppure su un braccio qualora ne sia munito (Fig. 2-11).

---

[43] BOWENS 2009, pp. 79-82.

All'oggi sono reperibili sul mercato molti modelli di questi veicoli filoguidati, anche di varie dimensioni, tra cui alcuni di grandezza contenuta e facilmente accessibili anche in termini economici. Potendoli pilotare direttamente dalla superficie offrono svariati e insostituibili vantaggi: primo fra tutti quello di non necessitare dell'operatore sott'acqua; inoltre quello di poter indagare con meno rischi i siti a profondità non facilmente accessibili; infine, per una campagna di scavo archeologico con dei subacquei che lavorino sul fondo, vi è la possibilità di stabilizzare il mezzo a determinate profondità ed inclinazioni, facendolo procedere con precisione durante la realizzazione dei filmati.

3. LA FOTOGRAMMETRIA

La tecnica denominata fotogrammetria consiste in una tipologia di rilievo che permette di ottenere informazioni metriche, quali forma e posizione, di oggetti tridimensionali, mediante acquisizione interpretazione e misura di immagini fotografiche. I campi in cui viene abitualmente impiegata sono: la cartografia, la topografia e l'architettura. Rispetto alle tradizionali tecniche di rilievo diretto offre i vantaggi di una considerevole uniformità di precisione, dovuta al rilievo simultaneo di molti punti, e ancor più la possibilità di effettuare l'elaborazione delle misure a posteriori, svincolandola dai tempi e dalle operazioni sul campo e agevolando così i controlli, le modifiche ed eventuali repliche.

La fotogrammetria consente quindi di determinare le caratteristiche degli oggetti senza avere un contatto fisico o diretto con essi. E' facile intuire come tutto ciò sia particolarmente rilevante nella scelta di una metodologia da applicare in un contesto subacqueo, in cui generalmente tra i limiti operativi più rilevanti ve ne sono molti legati proprio al tempo e alla interazione fisica con i reperti da rilevare.

Tramite la fotogrammetria è dunque possibile relazionare lo spazio tridimensionale dell'oggetto che si intende rilevare (l'insieme dei reperti, ad esempio), con lo spazio bidimensionale delle immagini dei fotogrammi. Per realizzare ciò, il principio che è alla base di questa tecnica prevede che siano utilizzate più fotografie dello stesso oggetto, scattate da punti di vista differenti: il minimo corrisponde ad almeno due, con tre è possibile aumentare la precisione, cinque rappresenterebbe la quantità ideale. In tal modo ad ogni punto dell'oggetto (P) interessato viene a corrispondere un punto dell'immagine (P') fotografica che lo ritrae (Fig. 3-1).

Si consideri viceversa che partendo da un fotogramma, ad ogni suo *punto immagine* possono corrispondere infiniti *punti oggetto* nello spazio poiché, se da una sola immagine non è possibile ricostruire le coordinate dei punti dell'oggetto (Fig. 3-2), disponendo al contrario di almeno due scatti dello stesso reperto, si possono ricavare i vari *punti oggetto* desumendoli dalle intersezioni dei corrispondenti *punti immagine* ritratti da punti di vista differenti (Fig. 3-3)[44].

Ne deriva che, in presenza di più fotogrammi, aumentando le intersezioni possibili per ogni *punto oggetto*, si innalza la possibilità di ridurre l'errore e con essa la correttezza nella determinazione del punto.

---

[44] Cfr. DORE 1938, pp.18-27.

Gli stessi punti oggetto catturati in diversi fotogrammi assumono la denominazione di "punti omologhi".

Dovendo sintetizzare le fasi del procedimento fotogrammetrico, si può osservare che sono sostanzialmente tre:

- la presa, ossia l'acquisizione delle immagini per mezzo di una camera fotografica;
- l'orientamento, cioè l'individuazione dei parametri della trasformazione da *coordinate immagine* a *coordinate oggetto*;
- la restituzione, ricavata dalla determinazione delle coordinate di vari punti dell'oggetto, per la ricostruzione dello stesso.

La relazione fra lo spazio bidimensionale delle fotografie e lo spazio tridimensionale dell'oggetto è detta "proiettività" e di conseguenza la trasformazione delle *coordinate immagine* in *coordinate metriche* reali è conosciuta come "trasformazione proiettiva". Queste trasformazioni tra i due sistemi di coordinate sono note come "rototraslazioni nello spazio", risolvibili algebricamente con *equazioni di collinearità* la cui risoluzione richiede che siano noti i parametri di orientamento i quali possono essere di due tipologie (v. Appendice):

- parametri di orientamento *interno*, in numero di tre, costituiti dalla lunghezza focale (f) della camera e dalle due coordinate del cosiddetto punto principale (PP) corrispondente alla proiezione dell'asse ottico sul fotogramma, che generalmente non coincide con il suo centro;
- parametri di orientamento *esterno*, in numero di sei, corrispondenti alle 3 coordinate del centro di presa e alle 3 rotazioni d'assetto, ovvero inclinazioni e rotazioni, che sono determinati dalla posizione che la camera di ripresa assume rispetto all'oggetto fotografato al momento dello scatto.

Come si è visto, per ricavare le coordinate dei punti dell'oggetto, è necessario utilizzare più immagini che lo ritraggono: ipotizzando il caso del numero minimo, cioè due, ad ogni *punto oggetto* corrisponderà un punto su ognuna delle due immagini e di conseguenza si verranno a determinare due equazioni di collinearità per ogni immagine. I parametri di orientamento interno saranno comuni, mentre i parametri di orientamento esterno saranno sei per ogni immagine, dato che ognuna avrà inevitabilmente un assetto diverso nello spazio.

Per quanto riguarda i parametri di orientamento interno, è da precisare che possono essere noti solo nel caso di impiego di camere professionali, meglio denominate metriche o semimetriche, poiché indicati direttamente dal produttore dell'apparecchio nel certificato di calibrazione,

operazione che viene effettuata in laboratorio durante la costruzione[45]. Dati i costi elevati di queste camere, per produrre una fotogrammetria è possibile utilizzare anche fotocamere amatoriali, più economiche e di facile reperibilità, ma delle quali non sono noti i parametri di orientamento interno. In tal caso sarà indispensabile calcolarli a posteriori attraverso un procedimento, detto di "autocalibrazione". Questo prevede che le equazioni di collinearità vengano sviluppate a partire da una serie di punti, i cosiddetti "punti di appoggio" o "punti noti", che dovranno essere ben evidenti sul fondale con l'utilizzo di *bersagli* o *mire*, visibili anche negli scatti fotografici[46] e che dovranno essere accuratamente rilevati dagli operatori per mezzo delle tecniche tradizionali. Tale soluzione, sicuramente più complessa, può essere semplificata avendo la possibilità di determinare a priori l'orientamento esterno della macchina fotografica e nello specifico se gli assi della camera sono paralleli tra loro e perpendicolari alla base di ripresa: ad esempio con una fotocamera montata su rotaia che garantisca la perpendicolarità dell'obiettivo rispetto al piano dei punti di ripresa (Fig. 3-4).

La restituzione in forma di elaborato grafico si otterrà tramite la ricostruzione in scala della geometria di ripresa. La precisione del prodotto finale sarà inevitabilmente influenzata: a livello planimetrico, dal fattore di scala tra l'area reale e le dimensioni del fotogramma; a livello altimetrico, dal rapporto della distanza tra camera e oggetto. Più tale distanza sarà ravvicinata, maggiore sarà la precisione del rilievo che si potrà ottenere ma al contempo sempre più ridotta sarà la porzione del sito riprodotta da ogni singolo fotogramma, il che imporrà di eseguire - e poi trattare - un numero elevato di foto, per ottenere la copertura completa dell'area interessata. In fase progettuale sarà quindi necessario considerare adeguatamente il giusto compromesso tra il tempo a disposizione per il procedimento fotogrammetrico subacqueo e il tempo che si potrà dedicare alla successiva rielaborazione dei dati accumulati, il tutto opportunamente coniugato con il grado di precisione che si intende raggiungere nel prodotto finale.

L'archeologo americano George Bass fu il primo ad impiegare la tecnica fotogrammetrica in un contesto archeologico subacqueo, tra il 1963 ed il 1964, in occasione dello scavo del relitto

---

[45] Per approfondimenti riguardo le camere metriche o semimetriche cfr. D'ANNIBALE 2005, pp. 25-26.

[46] Nelle fotografie vengono raccolti indistintamente tutti i dati che il sensore può visualizzare, per tale loro caratteristica esse sono da considerare riprese "neutre". Al contrario in un rilievo è fondamentale far risaltare ciò che interessa. A tale proposito in fase operativa, prima dell'acquisizione dei fotogrammi, potranno essere applicate delle marcature ben visibili, ad esempio sui contorni delle strutture o degli elementi da analizzare che, nella restituzione, sarà poi possibile evidenziare ulteriormente.

bizantino del VII secolo presso l'isolotto di Yassi Ada, in Turchia[47]. Attraverso la fotogrammetria fu documentato il carico di anfore vinarie bizantine che la nave trasportava e, dopo il loro recupero, la stessa tecnica fu adottata per lo scafo. Per metterla in pratica, a 6 metri sopra il relitto fu sospesa una barra orizzontale, alla quale era attaccata la camera fotografica, in modo che risultasse perpendicolare rispetto al sito; poi gli scatti furono eseguiti ad intervalli regolari, producendo coppie di fotografie stereoscopiche, dalle quali fu prodotta una fotogrammetria che permetteva di visualizzare il relitto in tre dimensioni se osservata attraverso un visore steroscopico. Per ogni coppia di fotografie era possibile misurare la parallasse per mezzo di un micrometro[48]; una volta conosciuto questo dato era possibile calcolare l'altezza (h) di ogni reperto dividendo il prodotto della lunghezza focale (f) utilizzata per le riprese e la distanza (D) tra i due scatti, con la misura della parallasse (p), secondo la formula:

$$h = \frac{f \cdot D}{p}$$

Nel 1964, sul vicino relitto del IV secolo, denominato *Yassi Ada II*, per concessione della Marina degli Stati Uniti, egli poté disporre del sottomarino a due posti *Asherah* con montate due macchine fotografiche, ed ebbe l'occasione di sviluppare e migliorare questa tecnica di documentazione. Appare evidente comunque come non si possa considerarla di corrente applicazione per il costo che comporta l'impiego di un tale mezzo, ma interessante è porre l'attenzione sul calcolo elaborato da Bass secondo il quale il lavoro subacqueo svolto con l'*Asherah* per le riprese fotografiche, risoltosi in poco meno di un'ora, avrebbe richiesto circa una dozzina di subacquei per diverse settimane di lavoro[49].

Nel 1966, per il rilievo del relitto ottocentesco del Sjaelland, vicino Copenaghen, Ole Crumlin-Pedersen ideò una strumentazione utilizzabile da un solo operatore costituita da un telaio, fornito di profondimetro ricavato da un altimetro aereo, che montava due camere Nikonos a 50 cm di distanza l'una dall'altra (Fig. 3-5)[50]. Le due macchine fotografiche erano state modificate in modo che marcassero il fotogramma per riconoscere da quale delle due era stato scattato ed erano in grado

[47] Cfr. BASS 1970, p. 104-105.

[48] Per approfondimenti riguardanti il fenomeno della parallasse cfr. D'ANNIBALE 2005, pp. 13-14.
[49] BASS 1970, p. 109.

[50] CRUMLIN-PEDERSEN 1977, pp. 163-177.

di produrre delle strisciate stereoscopiche, da cui era possibile rielaborare una fotogrammetria ma con l'ausilio di dispositivi, quali il restitutore fotogrammetrico. L'archeologo danese aveva già sperimentato la tecnica fotogrammetrica nei primi anni '60, sebbene in contesto non subacqueo ma in ambito di archeologia marittima, per gli scavi delle navi di XI secolo di Skuldelev, in Danimarca. Essendo il periodo quasi contemporaneo a quello dello scavo di George Bass presso Yassi Ada, ciò autorizza a considerarlo uno dei precursori di questa tecnica insieme al collega statunitense[51].

Come descritto nel capitolo precedente, per il rilievo dell'insediamento palafitticolo villanoviano del "Gran Carro", nel lago di Bolsena, è con la fotorotaia utilizzata da Alessandro Fioravanti che si è giunti alla realizzazione di una serie di strisciate fotografiche utili per ricavare la fotogrammetria del sito[52]. Le coppie di fotogrammi, attraverso uno stereoscopio accoppiato a una barra parallattica, secondo i principi della fotogrammetria, davano la possibilità di determinare: le dimensioni di ogni reperto rilevato, la differenza di quota tra un reperto e l'altro, così come la differenza di quota tra gli strati, producendo in tal modo una rappresentazione dell'intera area di scavo completa nelle tre dimensioni.

Jeremy Green propone due soluzioni per la realizzazione di coppie di foto stereoscopiche, alternative alla metodologia più tradizionale utilizzata da Bass per lo scavo a Yassi Ada[53]: la prima, consigliata in situazioni caratterizzate da tempistiche particolarmente ristrette, prevede il posizionamento direttamente sul sito di una torre fotografica munita di due camere (allineate in modo tale da avere gli assi ottici paralleli), senza che sia posta di volta in volta a livello durante gli spostamenti necessari per produrre le coppie di fotogrammi stereoscopici su tutta la superficie dell'area interessata; di conseguenza sarà successivamente necessario spendere molto tempo in fase di rielaborazione, cercando di mettere in scala il lavoro così prodotto attraverso l'individuazione di una serie di punti comuni dei reperti fotografati. Una seconda alternativa proposta da Green, caratterizzata dalla semplicità di utilizzo, consiste nel montare una coppia di fotocamere accuratamente allineate su di una barra sostenuta da un bipiede a "V", in modo tale che la struttura sia gestibile da un solo operatore, che ha la possibilità di tenerla costantemente perpendicolare al piano grazie a due livelle a bolla poste su di essa (Fig.3-6).

L'avvento del computer e del digitale ha fatto superare l'esigenza della perpendicolarità delle riprese, grazie alla possibilità di rielaborare i fotogrammi con software specifici, tanto per la realizzazione dei fotomosaici, come visto ad esempio nello studio proposto da Bruce Hartzler (Cfr. § 2), quanto per la fotogrammetria. Secondo Luc Long del DRASMM, nel futuro dell'archeologia

---

[51] BELTRAME 2012, p. 45.
[52] FIORAVANTI 1974, pp. 84-86.

[53] GREEN 1970, pp.116-120.

marittima, due sono le rivoluzioni che si stanno profilando: in primo luogo in sostituzione dei sommozzatori sarà attuato l'impiego di veicoli guidati dalla superficie che, non risentendo dei limiti umani operativi e di profondità, permetteranno di lavorare in totale sicurezza; in secondo luogo si punterà alla maggior riduzione possibile dell'annotazione manuale di misure e dati sul campo, anche se effettuata da esperti, allo scopo di scongiurare gli inevitabili errori dovuti al fattore umano[54].

La ricostruzione tridimensionale del relitto etrusco *Grand Ribaud F*, condotta da una equipe mista di archeologi e architetti, guidata da Pierre Drap, rappresenta un chiaro esempio delle possibilità offerte dalla più recente tecnologia[55]. Il relitto, caratterizzato da un carico di circa mille anfore, situato ad una profondità di 60 m, è stato oggetto di accurate indagini nel corso di due campagne condotte nel 2000 e nel 2001, sotto la direzione del DRASMM e con il supporto logistico della ditta francese COMEX, specializzata in lavori subacquei ad alta profondità, che ha messo a disposizione il sottomarino *Remora 2000* ed il ROV *Super Achille*. E' stato perciò possibile produrre la fotogrammetria del relitto *Grand Ribaud F,* applicando una macchina fotografica digitale scafandrata al sottomarino, in modo che l'asse ottico risultasse verticale. Sul sito erano state opportunamente posizionate dal ROV delle boe fluttuanti e delle paline graduate che potessero poi fornire rispettivamente i riferimenti verticali e le dimensioni degli oggetti (Fig. 3-7). Ne è risultato un totale di 200 fotogrammi circa dai quali, attraverso l'algoritmo SIFT, per la determinazione automatica dei *punti omologhi*, sono stati ricavati più di duemila *punti oggetto*. Il lavoro di orientamento delle fotografie, di calibrazione della camera e di correzione delle distorsioni ottiche, è stato eseguito con il software *Photomodeler 4.0*, infine il tutto è stato importato nel programma fotogrammetrico *Arpenteur*, ideato da Drap e Grussenmeyer[56]. Delle anfore costituenti il carico sono state eseguite ricostruzioni tridimensionali utilizzando sia le misure ottenute con la fotogrammetria sia quelle desunte dai modelli teorici ai quali gli studiosi sono risaliti dopo aver individuato le varie tipologie di anfore presenti[57]. I risultati ottenuti sono stati formalizzati con il sistema di gestione dati XML; la scelta di tale formato aveva lo scopo di creare dei file che avessero grande versatilità: contenere tutte le informazioni dei reperti rilevati (dalle misure bidimensionali o tridimensionali ai parametri fotografici degli scatti da cui sono stati ricavati) ed essere pubblicabili in HTML o PDF per poterli facilmente diffondere e reperire in qualsiasi momento, anche via Web.

[54] LONG 1998, pp.153-158.

[55] DRAP *et alii* 2002.

[56] Cfr. DRAP, GRUSSENMEYER 2000 e DRAP, GRUSSENMEYER, GAILLARD 2002.

[57] Dal momento che nei siti archeologici i reperti sono spesso distrutti, erosi o sovrapposti e quindi visibili solo parzialmente, è inevitabile che la fotogrammetria risulti sempre incompleta di dati. Di conseguenza sarà necessario integrarla con le rappresentazioni e i modelli teorici delle fonti. Cfr. DRAP, SEINTURIER, LONG 2003.

Si tratta dunque di un approccio decisamente globale[58]. I file XML generati per il relitto *Grand Ribaud F* sono stati inoltre elaborati in modo tale da poter essere interfacciati ai software grafici *VRML*, *PovRay* e *MicroStation*, per ricreare una completa rappresentazione in 3D del giacimento (Fig. 3-8).

Come scrive nel 2012[59], Drap considera la fusione di dati ricavati da misurazioni ottiche e acustiche una promettente tecnica per la documentazione di siti archeologici o relitti sommersi; essa prevede di combinare la batimetria ottenuta attraverso un sonar subacqueo

con il rilievo tridimensionale prodotto dalla fotogrammetria eseguita mediante strumentazioni fotografiche. Drap specifica che questo comporta però la necessità di riuscire a combinare insieme dei modelli tridimensionali caratterizzati da differenti densità di punti, operazione non particolarmente semplice[60].

---

[58] DRAP *et alii* 2002.

[59] DRAP 2012, pp. 121-122.

[60] Cfr. DRAP *et alii* 2005 e HURTOS, CUFI, SALVI 2010.

4. IL CASO STUDIO DEL RELITTO DEL *MERCURIO* (1812)

4.1 Storia delle ricerche

Nell'Alto Adriatico, di fronte alla costa del Friuli Venezia Giulia, in mare aperto, al largo della Punta Tagliamento a 7 miglia circa dalla costa e ad una profondità compresa tra 17 e 18 m, giace in due zone distinte, denominate "Area A" e "Area B" il relitto del *Mercurio*[61].

Il 22 febbraio del 2001, alcuni pescatori a bordo dell'*Albatros*, motopeschereccio di proprietà della famiglia Scala di Marano Lagunare, svolgendo consuete attività di pesca, agganciarono in modo del tutto casuale un voluminoso pezzo di artiglieria ricoperto da concrezioni e alcuni calderoni di rame deformati. La famiglia Scala ne diede avviso alla Soprintendenza per i Beni Archeologici del Veneto che in tempi immediatamente successivi cominciò le prime operazioni di indagine avvalendosi della collaborazione della Ditta Caressa di Grado, sotto la direzione degli archeologi Carlo Beltrame e Dario Gaddi.

Dati gli iniziali risultati più che incoraggianti, grazie al finanziamento di vari enti ed istituti[62], a partire dal 2004 furono condotte altre ricerche che portarono al ritrovamento delle varie parti del relitto e al riconoscimento in esso della nave militare ottocentesca che al momento dell'affondamento portava il nome di *Mercurio*[63]. Si tratta di otto campagne di scavo, ininterrottamente dirette da Carlo Beltrame, anche in qualità di coordinatore del progetto, che fino al 2011[64] hanno visto la restituzione di una quantità veramente notevole di reperti navali e non solo[65]: centinaia di oggetti di equipaggiamento[66] e armamento[67], svariati oggetti anche di carattere

---

[61] BELTRAME 2007, p. 137.

[62] La Regione Friuli Venezia Giulia e quella del Veneto, la città di Lignano Sabbiadoro o il Ministero per i Beni e le Attività Culturali, unitamente ad altri, sono solo alcuni dei soggetti finanziatori che una sola volta, o più, hanno permesso di realizzare le campagne di scavo.

[63] La collaborazione con il Dipartimento di Scienze dell'Antichità e del Vicino Oriente di Ca' Foscari di Venezia, avviata dal 2004, ha portato all'allestimento di uno scavo-scuola sul sito che, costituendo una fonte di esperienza didattica sul campo, tra le poche attivate in Italia in ambito universitario, ha permesso la partecipazione di non pochi studenti italiani e stranieri.

[64] Cfr. BELTRAME, GADDI 2002 e BELTRAME 2004; 2005 a, 2005 b, 2005 c; 2006 a, 2006 b; 2007; 2008.

[65] BELTRAME-NICOLARDI 2009, pp. 5-30 e BELTRAME 2012, p. 235-249.

personale[68], armi bianche e da fuoco[69], suppellettili di bordo[70] e molti resti, non ancora ben identificati, tra cui alcuni di tipo osteo-antropico[71] di notevole rilievo sia perché rarissimi in sé, sia perché rappresentano il maggior numero di scheletri (o parti di scheletri) sino ad ora scoperti in un relitto storico di area mediterranea[72]. Con il prosieguo delle ricerche, il relitto si è altresì dimostrato prezioso anche sotto altri aspetti: per lo studio dell'evoluzione dell'archeologia navale italiana, poiché costituisce all'oggi il più antico relitto sommerso battente bandiera tricolore; per lo studio delle tecniche e tecnologie navali di epoca moderna data la quantità e qualità dei pezzi di artiglieria che vi sono stati rinvenuti[73]; e naturalmente per i fatti bellici di cui fu testimone e protagonista, inquadrabili tra gli accadimenti storici più significativi del primo Ottocento, che condussero alla parabola discendente della meteora napoleonica[74].

A tale proposito, per meglio comprendere tutto ciò che ha contribuito alla scoperta e allo studio del relitto, è utile ricordare che ben prima del fortuito ritrovamento operato dall'*Albatros*, si era verificato un recupero molto importante che più tardi avrebbe trovato corrispondenza con la zona di interesse del sito. Nel 1985, al largo di Grado, a 15 miglia circa dalla costa, erano state rinvenute 22 "palle" di cannone in ferro, da 24 libbre. Claudio Grioni, dopo accurate ricerche, supportate da documenti d'archivio, nel 1988, aveva proposto - in un suo studio intitolato *Guerra*

---

[66] Un'ancora, svariati lingotti per la zavorra, una bitta di piccole dimensioni, un rampino da abbordaggio, svariati resti di bozzelli lignei di diverse dimensioni, molti resti di cime e gomene, ombrinali di piombo, chiavarde e chiodi di bronzo, bigotte, lande delle manovre.

[67] Due cannoni lunghi di 2,5 m da 8 libbre e quattro carronate da 24 libbre, una petriera in bronzo ad avancarica brandeggiabile e numerose palle di cannone.

[68] Monete, un sigillo di piombo probabilmente appartenuto al comandante, molti bottoni da uniforme diversi per foggia, grandezza e materiale (ad esempio: osso per i marinai semplici e lega di stagno per gli artiglieri di marina), gioielli d'oro, resti di cuoio cucito appartenenti a calzature presenti in notevole quantità, porta aghi di legno e ditali, uno spazzolino da denti di tartaruga, una pipa.

[69] Sciabole ed else di spade; acciarini e pallini da moschetto, pistole d'abbordaggio.

[70] Bottiglie di vetro, piatti, tazzine e anforette di ceramica, vasi e brocche.

[71] BERTOLDI 2007, pp. 147-149.

[72] Della loro analisi si occupa la prof.ssa Francesca Bertoldi docente di Antropologia Fisica presso l'Università di Ca' Foscari.

[73] BELTRAME 2012, p. 242.

[74] Nel Mediterraneo è "…*uno dei pochissimi relitti di nave militare moderna oggetto di un progetto di ricerca…*" BELTRAME 2012, p. 243.

anglo-francese in Adriatico al tramonto dell'Impero Napoleonico[75] – l’ipotesi che si trattasse di proietti relativi ad un evento bellico rintracciabile nelle fonti scritte, e citato come Battaglia di Grado: svoltasi all’alba del 22 febbraio 1812 al largo della cittadina stessa, al tempo in cui la Gran Bretagna, acerrima oppositrice della Francia, tentava di sottrarle il controllo dell’Alto Adriatico. Le stesse fonti riportavano che la battaglia aveva visto il prevalere delle forze britanniche con l'esplosione e l'affondamento di una sola imbarcazione il cui nome era *Mercurio*: un brigantino della flotta italiana, in quel momento impegnato nella navigazione in quelle acque con altre tre navi franco-italiane. Degli stimati 92 individui di equipaggio ne erano stati trovati vivi solo tre, ma con ferite e ustioni talmente gravi che erano sopravvissuti solo per poco, sebbene fossero stati soccorsi dal brig inglese *Weasel* autore dell’affondamento del *Mercurio*.

Grioni alla luce di tutto ciò collocava la datazione dei 22 proietti tra il XVIII e il XIX secolo e si riteneva convinto che dovesse esservi un relitto di nave militare di epoca napoleonica nei fondali circostanti.

A distanza di più di dieci anni, con gli ulteriori reperti rinvenuti dall’*Albatros* più a sud, ma comunque in area di prossimità, tali ipotesi cominciarono a prendere corpo.

Inizialmente la bocca da fuoco, ritrovata insieme ai calderoni di rame deformati, fu affidata all’esame dell'esperto di armi, Marco Morin, che in essa riconobbe una “carronata francese” in ghisa, da 24 libbre, ovvero un cannone ad avancarica, a canna corta, più leggero e meno ingombrante dei pezzi ordinari, di largo impiego tra il 1778 e la prima metà del 1800, installato sia sulle navi commerciali, che lo adottarono per prime, sia su quelle militari. Il primo esemplare era stato infatti prodotto in Scozia dalla ditta *Carron Company* nel 1778[76] per la Compagnia delle Indie Orientali che, nella necessità di difendersi da eventuali attacchi di pirateria, lo aveva ritenuto efficace e al tempo stesso maneggevole e ben compatibile con le sue attività mercantili e di carico, quindi di natura non militare.

Dopo il restauro e la ripulitura dalle concrezioni, il pezzo di artiglieria rivelò due interessanti incisioni: l’anno *1806* e la scritta *De Creusot* che indica il nome della Reale Fonderia parigina di epoca napoleonica da cui proveniva. Fu un buon punto di partenza e, attraverso le fonti scritte, si poté risalire al tipo di imbarcazione alla quale la carronata era destinata. Si tratta del "brick" o “brig” ossia del brigantino: un'agile imbarcazione militare, delle dimensioni di circa 32 metri di lunghezza e 9 di larghezza, con un solo ponte, due alberi forniti di vele quadrate e di una grande trapezoidale, armato probabilmente con 16 carronate da 24 libbre e successivamente dotato di 2

---

[75] Nel titolo erano già presenti tutti gli aspetti storico-militari che sarebbero poi emersi e sarebbero stati confermati dagli scavi subacquei. GRIONI 1988, p. 121-145.

[76] BELTRAME 2012, p. 241.

cannoni ordinari (previa eliminazione di 2 carronate)[77]. Da ciò si poté risalire all'imbarcazione rispondente a tali caratteristiche, il *Mercure*, di cui è nota la storia[78]: commissionato nel 1805 dalla marina francese e costruito a Genova, dove era stato terminato nel 1806, tra il 1809 ed il 1810, in virtù di uno scambio, era stato ceduto al Regno d'Italia entrando a far parte della flotta stanziata a Venezia, con il nome italianizzato di *Mercurio*. In quello stesso torno di tempo, secondo un ambizioso piano napoleonico, presso l'Arsenale di Venezia si iniziava la costruzione, tra vascelli, fregate e brig, di altre 29 navi militari: a non molta distanza dalla disfatta di Trafalgar e con la Gran Bretagna più agguerrita che mai, avrebbero concorso all'indispensabile ricostituzione della flotta imperiale. Di queste 29 imbarcazioni, due vascelli furono assegnati alla flotta franco-italiana, altri tre invece a quella francese: tra questi ultimi vi era il *Rivoli* da 74 cannoni, varato alla fine del 1811, tra novembre e dicembre. Qualche mese dopo, il 20 febbraio 1812, nonostante la stagione non del tutto propizia alle manovre navali, per esplicito volere di Napoleone, il nuovo vascello *Rivoli* fu fatto uscire dal porto veneziano di Malamocco per spostarlo altrove in mare aperto a sostegno della flotta franco-italiana impegnata a contrastare quella inglese[79] che, con una piccola squadra formata dal brig *Weasel* e dal vascello *Victorius*, già da qualche giorno sorvegliava attentamente anche la costa veneto-friulana in attesa di possibili manovre francesi.

Il *Rivoli*, insieme ai brig che lo scortavano, *Mameluk* con bandiera francese, *Jena* e *Mercurio* entrambi con bandiera italica, usciti da Malamocco, in direzione sud, riuscirono a coprire solo un breve tragitto a causa di una fitta nebbia. Il giorno seguente, il 21 febbraio, orientata la rotta in senso inverso, in direzione Trieste – e non è chiaro per quale motivo - furono avvistati e poi persi dalla marina inglese durante il primo pomeriggio. Fatte ancora poche miglia, al calar della sera si arrestarono, probabilmente in attesa di migliore visibilità. Così, all'alba del giorno 22, furono nuovamente avvistati e sorpresi dal nemico che aprì il fuoco a breve distanza contro di loro approfittando di favorevoli contingenze quali: il *Mercurio* che era restato indietro, il *Rivoli* che si era fermato per attenderlo e aveva inoltre ridotto la velatura.

---

[77] Sul fondale di Grado, ad oggi, sono stati rinvenuti complessivamente due pezzi lunghi e otto carronate (quattro accanto al relitto di prua e quattro in posizione più distanziata). Nelle fonti vi è però discordanza sul numero di carronate che avrebbe costituito l'equipaggiamento iniziale del *Mercurio*.

[78] A tale proposito confrontare: BELTRAME, GADDI 2002; BELTRAME 2009 e 2010.

[79] E' ancora aperto l'interrogativo se il *Rivoli* fu mosso con l'intento di essere inviato a sud nei pressi del porto di Ancona, o ad est nei pressi del porto di Trieste, BELTRAME-NICOLARDI 2009, p. 17.

Lo scontro fu violento, della breve durata di quaranta minuti circa e si avviò a rapida conclusione con la cattura del *Rivoli* e l'inabissamento del *Mercurio* dopo l'esplosione che ne provocò la spaccatura dello scafo.

Con la perdita del vascello all'inizio del primo viaggio mai completato e il prevalere così reiterato da parte della flotta nemica, fu inferto un colpo alla marina francese tale da riverberarsi su tutto il restante destino napoleonico.

L'affondamento del *Mercurio* muove invero delle perplessità sul reale obiettivo inglese: sorprende la determinazione e l'alto margine di rischio con cui i britannici condussero tutta l'operazione visto che erano in numero palesemente inferiore. I registri di bordo italiani inoltre non lo riportano, soltanto da fonti d'archivio si apprende come sul *Mercurio* fosse imbarcato un sottocommissario, una sorta di ufficiale amministrativo - di consuetudine in servizio a terra - che non è chiaro per quale motivo fosse sul *brig*. Sono state fatte delle ipotesi, collegate al ritrovamento di alcuni gioielli di pregevole fattura, la cui presenza non è propriamente congrua con una nave militare, relativamente ad una missione di massima importanza e segretezza, ma ciò contribuisce ad aumentare gli interrogativi a cui non si è in grado di dare risposta e che per ora neppure l'ausilio dei documenti consente di sciogliere.

Oggi sul fondale friulano nella zona denominata "Area A" giace insabbiato quel che resta della parte di prua del *Mercurio*, in posizione di navigazione, coricato sul fianco sinistro, insieme ai pezzi di artiglieria pesante (i già citati due cannoni lunghi e quattro delle otto carronate rinvenute[80]), alle armi, alle attrezzature e agli oggetti ricordati. Lì sono anche i resti osteo-antropici che appartengono molto probabilmente a sette individui di età compresa tra i 18 e i 40 anni.

Più a nord, ad una distanza di 55 metri circa, nella cosiddetta "Area B", giace ciò che rimane del dritto di poppa.

Il tipo di distacco e il taglio netto dei due tronconi, nonché la distanza a cui è stato ritrovato il dritto di poppa fanno supporre che nel cannoneggiamento sia stata colpita la santa barbara del *Mercurio*. Da ciò l'inevitabile deflagrazione ed il rapido affondamento a causa del quale l'equipaggio non avrebbe avuto tempo di mettersi in salvo in modo alcuno, restando nella maggior parte dei casi inesorabilmente intrappolato sotto le strutture lignee[81].

---

[80] Ciò "*... ha permesso di verificare l'applicazione del decreto imperiale del 1809 che prevedeva la sostituzione di due carronate con altrettanti pezzi lunghi ...*" per via della scarsa gittata delle prime che portò poi nel tempo alla loro totale eliminazione nei *brig*. BELTRAME 2012, p. 244.

[81] BELTRAME 2012, p. 244.

Scavi, rilievi e analisi archeologiche hanno proceduto di pari passo con quanto riportato dai documenti scritti noti, delle tre nazioni coinvolte (Francia, Italia e Gran Bretagna) cercando di verificarne l'esattezza o fornendo spunti nuovi. Il lavoro non può certo dirsi terminato.

Nel percorso arduo e accidentato della ricerca storica è frequente imbattersi in discrepanze tra le fonti, ossia tra ciò che quelle scritte affermano e ciò che quelle materiali mostrano e dimostrano: il caso del *Mercure* non fa eccezione e ne è anzi un esempio alquanto evidente.

Le informazioni fornite da rapporti, registri, cronache, dispacci, relazioni o altri simili documenti, siano essi coevi o posteriori agli eventi, sono spesso in contraddizione o forniscono versioni discordanti; presentano a volte palesi lacune, involontarie o intenzionali che siano; sono inficiati da atteggiamenti di parte o dall'immagine che si voleva tramandare ai posteri. Al contrario la ricerca archeologica per sua natura segue metodi operativi e soltanto questi ultimi possono utilmente integrare le mancanze o smentire le contraddizioni delle fonti scritte, concorrendo altresì a sciogliere parte dei dubbi.

Non è escluso dunque che future campagne sul relitto del *Mercurio* possano riservare altre interessanti scoperte[82].

---

[82] BELTRAME 2012, pp. 247-249

4.2 Tecniche di documentazione fotografica applicata

Al momento di decidere la metodologia fotogrammetrica da seguire per il sito del relitto del *Mercurio*, innanzi tutto si è dovuto tenere in considerazione il contesto ambientale: l'acqua in questa zona, come in gran parte dell'Alto Adriatico del versante italiano, raramente supera una trasparenza superiore ai 3 o 5 metri; la scarsa visibilità, con l'aumentare della distanza di ripresa, causa perdita di definizione delle immagini fotografiche, producendo una sfumatura dei contorni che poi ostacola operazioni quali l'interpretazione o la restituzione grafica di importanti dettagli (Fig. 4.2-1).

E' stato quindi scelto di mantenere la distanza di ripresa tra 1,5 e 2,5 m circa dagli oggetti da rilevare, avendo così il vantaggio di operare con un basso fattore di scala tra l'area reale e le dimensioni del fotogramma. Ne è derivata un'alta definizione delle immagini e la minimizzazione degli errori dovuti alle distorsioni delle apparecchiature di ripresa, pur giungendo alla inevitabile produzione di un elevato numero di fotografie su cui dover lavorare successivamente (Cfr. § 2).

Per mettere in pratica le operazioni fotogrammetriche è stato costruito sul sito un telaio metallico di 3 x 3 m, con i lati graduati a distanze fisse di 10 cm, attrezzato con un binario mobile, anch'esso graduato, sul quale scorreva un carrello con fissata la macchina fotografica, in modo che l'obiettivo risultasse perpendicolare rispetto al piano dei punti di ripresa (Fig. 4.2-2). Detto telaio era sostenuto da quattro montanti stabili di altezza regolabile e, attraverso una livella a bolla, è stato possibile disporlo in modo tale che il piano di ripresa risultasse sempre parallelo al sito. Per eseguire le operazioni fotogrammetriche, non riuscendo a coprire tutta l'area interessata, esso è stato spostato di volta in volta sui diversi quadranti in cui era stato suddiviso il sito. La fotogrammetria effettuata sul relitto del *Mercurio* è tecnicamente definita "non convenzionale", in quanto le riprese dei fotogrammi sono state eseguite con una comune fotocamera subacquea e non con una specifica camera metrica o semimetrica; di conseguenza, non essendo noti da principio i parametri di orientamento interno, si è dovuto calcolarli a posteriori con il processo di autocalibrazione a partire dalle coordinate di "punti di appoggio" noti. Per tale motivo si è provveduto a crearli e rilevarli su ogni montante e su ogni base, insieme ad altri cinque, distribuiti all'interno di ciascun riquadro, ponendo attenzione a che risultassero poi ben visibili nei fotogrammi. Di tutti questi punti sono state anche registrate le quote, con la precisione del centimetro, grazie all'utilizzo di una livella ad aria, il cui caposaldo di riferimento era costituito da un picchetto esterno alla zona rilevata. Misurando la quota del piano formato dai quattro lati del telaio rispetto allo zero individuato nel picchetto che fungeva da caposaldo, la distanza del piano di ripresa rispetto alla superficie da

rilevare si è potuta mantenere correttamente tra gli 1,5 ed i 2,5 m così come stabilito in precedenza. Nel definire invece l'orientamento esterno della macchina, il procedimento usato per sviluppare il rilievo derivato dalla presente fotogrammetria (nel quale, come si è visto non si conosce a priori l'orientamento interno della macchina, motivo per cui si è dovuto procedere assegnando un determinato orientamento esterno) prende il nome di "schema normale" o "schema nadirale" in cui gli assi delle prese fotografiche sono paralleli tra loro e perpendicolari alla loro base di ripresa e la lunghezza focale è mantenuta costante[83]. Quest'ultima, pur non essendo nota, dato l'impiego di una fotocamera amatoriale compatta, è stato possibile ricavarla a partire dalla quota di un "punto di appoggio" (vedi Appendice).

Per coprire l'area di ogni quadrante di scavo, si è proceduto con l'esecuzione di quattro strisciate fotografiche distanziate 80 cm l'una dall'altra, e con scatti intervallati regolarmente a 40 cm, producendo quindi otto fotogrammi per ogni strisciata, per un totale di trentadue per ogni riquadro (Fig. 4.2-3). Queste distanze sono state scelte in modo che ogni immagine scattata producesse una sovrapposizione di oltre il 50% con quelle adiacenti allo scopo di riprendere ogni oggetto in almeno tre fotogrammi contigui per strisciata. Ogni punto rilevato è stato in tale maniera determinato planimetricamente da almeno due coppie di fotogrammi.

Grazie poi ad una parziale sovrapposizione anche tra le strisciate adiacenti, il numero di "punti omologhi" è potuto aumentare in modo significativo, portando l'accuratezza della localizzazione dei punti in planimetria ad uno scarto di errore di soli 2 o 3 cm. Poter disporre di tutti questi "punti omologhi" in più coppie di fotogrammi, ha offerto la possibilità di individuare ed eliminare la presenza di eventuali errori insorti durante la restituzione. Si è verificato talvolta un non corretto posizionamento della camera fotografica durante la ripresa, ma si è potuto ricalcolarne l'assetto fino a ricostruire l'esatta geometria di presa.

I fotogrammi, ed il rilievo che ne è derivato, di seguito utilizzati per spiegare la metodologia adottata, risalgono alla campagna di scavo del 2008; le fotografie sono state eseguite con la macchina fotografica analogica subacquea *Nikonos V* con obiettivo da 28 mm, ed i negativi a colore sono poi stati digitalizzati attraverso uno scanner ad alta risoluzione. Nelle ultime due campagne, risalenti rispettivamente al 2010 ed al 2011, è stata usata invece una macchina fotografica digitale scafandrata e le fotografie sono state eseguite alla massima risoluzione, acquisendo contemporaneamente i file in formato JPEG e RAW. Durante la fase di restituzione le immagini sono state ridotte di dimensione per non rallentare e appesantire l'elaborazione più del dovuto, ma

---

[83] Cfr. DORE 1938, pp. 23-27.

con la possibilità - nel caso di perdita di alcuni dettagli di piccole dimensioni ritenuti importanti - di poterli recuperare dal formato originale.

Nella fase di restituzione, per produrre il rilievo è stata messa in pratica una tecnica mista: per elaborare la planimetria è stato adottato un sistema grafico-analogico, mentre le quote per l'altimetria sono state calcolate analiticamente.

La restituzione planimetrica è stata realizzata con il software per grafica vettoriale *Corel Draw* basandosi sul procedimento secondo il quale si disegnano le linee passanti tra i centri delle immagini ed i punti da rilevare, posizionando i centri dei fotogrammi ad una distanza in scala rispetto alla base: in tal modo le intersezioni prodotte generano una planimetria in scala dei punti dei reperti fotografati (Fig. 4.2-4).

Su questa base i fotogrammi sono stati tutti caricati nel programma e disposti contemporaneamente in scala rispetto alla posizione reale di ripresa (Fig. 4.2-5).

Con il comando *freehand tool* si è proceduto disegnando tutte le linee che, a partire dai centri delle immagini, e passando per i rispettivi "punti omologhi", creavano le intersezioni per identificare in scala i punti degli oggetti fotografati (Fig. 4.2-6).

Continuando a tracciare le intersezioni si è potuto notare che partendo da tre fotogrammi se ne potevano produrre tre, ma diventano sei lavorando con quattro fotogrammi. Inoltre molti "punti omologhi" potevano essere individuati anche nelle parti di sovrapposizione tra strisciata e strisciata, ed in questo modo le intersezioni arrivavano a raddoppiare (Fig.4.2-7).

Si può notare chiaramente come i trentadue fotogrammi, ripartiti in otto per ognuna delle quattro strisciate, possano essere considerati come un unico blocco concatenato di immagini, con parametri di orientamento esterno noti.

Avendo come riferimento tutte le intersezioni prodotte e sapendo che corrispondono in scala ai punti del giacimento fotografato, è stato finalmente possibile tracciare il disegno della porzione di scafo rilevata (Fig. 4.2-8).

Il disegno così prodotto con estensione CDR è stato esportato in formato JPEG per permetterne la lettura su qualsiasi supporto e per semplificare la gestione del file (Fig. 4.2-9).

La restituzione altimetrica è stata realizzata invece con un procedimento analitico. Non essendo nota la lunghezza focale (f) della macchina fotografica utilizzata, non si poteva conoscere esattamente la misura dell'altezza (h) rispetto al centro ottico; il sistema di rilevamento utilizzato prevedeva però che la messa a fuoco, dopo essere stata impostata inizialmente, non venisse più cambiata, rappresentando dunque un parametro costante, così come la distanza tra uno scatto e l'altro e di conseguenza la distanza (B) tra i centri ottici dei fotogrammi, corrispondente a 40 cm. Ne consegue che anche il prodotto (K) tra queste due misure sia stato assunto come costante:

$$f\,B = K$$

Nel sistema utilizzato, per ogni coppia di fotogrammi, questo prodotto equivaleva anche al prodotto tra l'altezza (h) rispetto al centro ottico e la parallasse longitudinale (ξ_1 - ξ_2) [v. *Appendice*]:

$$K = h\,(\xi_1 - \xi_2)$$

Non conoscendo però il valore esatto dell'altezza (h), come osservato precedentemente, l'equazione proposta non poteva essere considerata lineare; è stato perciò necessario procedere per reiterazioni: inizialmente i calcoli sono stati eseguiti assumendo come altezza (h) la misura dell'altezza al piano pellicola, costituita dalla somma della quota (Pr) di ogni singolo punto, misurata in fase operativa per mezzo della bolla ad aria rispetto allo zero subacqueo, con la distanza (Pq) del piano pellicola sopra al telaio, cioè 5 mm. Da questo avrebbe poi dovuto essere sottratta la misura della lunghezza focale, ma essendo una incognita si è deciso inizialmente di provare con la misura dell'obiettivo posto all'infinito ($f\infty$), nel caso in questione corrispondente a 28 mm, per poi procedere appunto per reiterazioni. Per ogni punto si è quindi ottenuto:

$$h = Pr + Pq - f\infty$$

Misurando, nei due fotogrammi consecutivi interessati, il valore della parallasse longitudinale (g+g1) e determinato il valore dell'altezza (h), è stato possibile risolvere l'equazione precedentemente presentata:

$$K = h\,(\xi_1 - \xi_2)$$

Conoscendo a quel punto il valore approssimativo della costante (K) si è risaliti alla prima misura approssimata della lunghezza focale (f):

$$f = K / B$$

Reiterando i calcoli con le misure di ogni 'punto noto' e facendo alla fine una media aritmetica, è stato ricostruito un valore della lunghezza focale (f) molto vicino alla realtà, con un errore compatibile con il grado di precisione previsto per il lavoro in questione. Ricavato questo parametro, è stato finalmente possibile calcolare la quota di ogni punto secondo la seguente formula:

$$h = \frac{f \cdot B}{\xi 1 - \xi 2}$$

A conclusione, le misure delle quote così ottenute sono state inserite nella planimetria precedentemente realizzata, per aggiungere al disegno la terza dimensione spaziale (Fig. 4.2-10).

I rilievi sviluppati negli anni con la presente tecnica, dalle varie campagne di scavo condotte sul *Mercurio*, sono stati uniti di volta in volta producendo un unico rilievo aggiornato (Fig. 4.2-11).

Tutti i dati raccolti durante queste campagne sono stati inseriti in formato digitale nella piattaforma open source Quantum GIS[84]: caricando le basi cartografiche, è stato possibile collocare topograficamente il relitto del Mercurio, attraverso la georeferenziazione, inserendo i rilievi fotogrammetrici prodotti fino al 2011. L'utilità più grande è stata quella di poter organizzare i diversi dati creando dei layer, agganciati a una tabella attributi, per distinguere, e di conseguenza gestire e visualizzare, le varie tipologie di reperti rilevati; in questo modo si ha dunque la possibilità di ottenere delle carte categorizzate attraverso una differenziazione cromatica, mettendo in evidenza solo alcuni tipi di oggetti o tutti contemporaneamente.

Successivamente è stata inserita la planimetria del piano di coperta del modello del brick *Le Cigne*[85], nave gemella del Mercurio, cercando di far coincidere i profili delle rispettive fiancate e la posizione dei cannoni di prua, con l'obiettivo di collocare i reperti all'interno della struttura del brigantino e di conseguenza poterne comprendere la sua organizzazione spaziale (Fig. 4.2-12)[86].

---

[84] *http://www.qgis.org*

[85] BOUDRIOT, BERTI 1981.

[86] Le informazioni e l'elaborazione grafica sono state gentilmente fornite da Stefania Manfio, traendole dalla sua tesi, discussa nell'Anno Accademico 2012-2013, intitolata *Cucina e alimentazione a bordo di una nave militare di età napoleonica. Analisi dei materiali della cambusa del relitto del Mercurio (1812).*

Il progetto è attualmente ancora in fase di sviluppo ed il database è stato concepito per poter essere aggiornato e migliorato in futuro.

5. IL CASO STUDIO DEL RELITTO CON UN CARICO DI MARMI *PUNTA SCIFO D* DEL III SECOLO d. C.

5.1 Storia delle ricerche

Sulla costa ionica della Calabria, a poco più di una decina di chilometri circa dalla città di Crotone, si apre la baia di Scifo: un arco costiero - racchiuso tra i due piccoli promontori di Capo Pellegrino a nord e Capo Alfieri a sud - che per la sua naturale configurazione fin dall'antichità ha offerto riparo ed approdo portuale[87].

All'interno di questa baia, ad una distanza di 160 metri dalla linea di costa in direzione sud-ovest dal promontorio di Capo Pellegrino[88] e ad una profondità che non supera i sei metri e mezzo o sette, in un'area ricca di testimonianze archeologiche, giacciono i resti di un carico navale di ragguardevoli dimensioni, di epoca romana, probabilmente a causa di un naufragio.

Dell'imbarcazione sono state rinvenute scarsissime tracce mentre, adagiato sul fondale sabbioso, è possibile osservare ancora oggi in tutta la sua consistente mole, quello che fin da subito si è rivelato come il più grande ritrovamento di carico lapideo sommerso tra quanti fino ad ora noti nel Mediterraneo, che gli studi hanno stimato superiore alle 350 tonnellate[89].

Per differenziarlo da altri relitti e ritrovamenti presenti, anche a poca distanza, nella stessa zona, è stato censito con la denominazione di *Punta Scifo D*[90]. Se ne conosce l'esistenza a partire dalla fine del 1986 anno in cui fu rinvenuto e segnalato alla Soprintendenza per i Beni Archeologici della Calabria dal subacqueo crotonese Luigi Cantafora.

---

[87] "*… questo settore della costa costituì in ogni tempo un luogo ridossato dove poter stazionare e attendere condizioni meteomarine favorevoli alla navigazione.*" AA.VV., *Il Relitto Punta Scifo D – Campagna di Ricerche subacquee 2011 – Relazione preliminare,* 2013, p. 5.

[88] AA.VV. 2013, p. 5.

[89] BELTRAME 2012, p. 174.

[90] I relitti di altre due navi lapidarie sono stati così censiti: *Punta Scifo A* e *Punta Scifo B*, un altro di epoca greca, posto a soli 20 metri circa di distanza da quello in oggetto, con un carico in cui compaiono anfore e altri oggetti fittili, porta la denominazione di *Punta Scifo* C, altri relitti seguono lo stesso criterio progressivo; AA.VV. 2013, p. 6 e 9.

La Soprintendenza aprì allora una campagna archeologica conoscitiva, affidando l'incarico alla Cooperativa Aquarius che vi lavorò nel 1987 con la direzione della dottoressa Alice Freschi.

In un'area larga 22 m e lunga 16 m circa, su di un modesto spessore sabbioso, furono per la prima volta esaminati 54 manufatti, tra blocchi e lastre di marmo di dimensioni variabili, molti dei quali di grande pezzatura, anche fino a 4 metri di lunghezza.

Da questa prima tornata di scavo, condotta con l'ausilio di sorbona e l'impiego di tradizionali tecniche fotografiche, scaturì un rilievo archeologico che divenne poi imprescindibile punto di partenza per tutte le campagne seguenti[91].

Furono avanzate le prime ipotesi sia in quanto a cause dell'evento, epoca e dimensioni dell'imbarcazione, sia relativamente alla provenienza e caratteristiche del carico. In base alle osservazioni conclusive formulate in quell'occasione, Salvatore Medaglia così riportava:

- *Il relitto con marmi va collocato al III o al IV secolo d.C.*
- *Le dimensioni dello scafo dovevano approssimativamente essere di m 30 x 7.*
- *Il naufragio avvenne a causa di condizioni meteomarine avverse dopo che la nave si infranse su scogli affioranti.*
- *Il carico lapideo proveniva da cave orientali (greche o egee) ed era composto da blocchi e lastre in numero complessivo di 54.*
- *Il materiale marmoreo trasportato a bordo doveva avere un peso di circa 300 tonnellate.*
- *Lo scafo era costruito con un sistema di "mortase doppie" disposte alternativamente.*
- *La nave naufragò con la prua rivolta verso la costa e, una volta raggiunto il fondale, il suo asse longitudinale assunse un orientamento nord-ovest/sud-est.*
- *La gran parte dei materiali mobili, ceramici e metallici recuperati, erano utilizzati dai marinai di bordo.*
- *Eccetto pochi brandelli lignei celati al di sotto di alcuni blocchi o tra gli interstizi degli stessi, lo scafo non si è conservato a causa del fondale roccioso che ne ha impedito la conservazione.*[92]

Solo ad una certa distanza di tempo da questa prima campagna di scavo, seguirono altre indagini subacquee e alcuni studi, anche con esiti discutibili.

---

[91] AA.VV. 2013, pp. 9-14, si veda in proposito il secondo capitolo, *Storia delle ricerche e degli scavi* redatto a cura del dott. Salvatore Medaglia, Università della Calabria il quale tre anni prima aveva redatto una *Carta Archeologica della Provincia di Crotone* inserendovi a buon diritto anche il relitto in oggetto: MEDAGLIA 2010, PP. 294-295.

[92] AA.VV. 2013, p. 9-14.

Nell'anno 2006, a testimonianza dell'interesse attivo per la valorizzazione del considerevole patrimonio locale, veniva allestito il primo nucleo del Museo Archeologico nella vicina località di Capo Colonna. Destinato, come è ovvio pensare, all'incremento dei depositi nonché all'ampliamento della sua funzione quale punto di riferimento delle attività di scavo e studio archeologico subacqueo realizzate nella zona.

Poco dopo, due campagne di ricerca a più largo raggio furono effettuate nel 2007, nell'ambito del progetto del MIBAC Archeomar, nel corso delle quali si provvide alla ricognizione e censimento di tutte le evidenze archeologiche presenti nell'area subacquea di punta Scifo e per la prima volta fu restituito il preciso collocamento di ogni relitto con l'impiego delle più aggiornate tecnologie satellitari mediante dispositivo GPS[93].

Infine nelle campagne più recenti, realizzate nel 2011[94] e 2013, dal Dipartimento di Studi Umanistici sotto la direzione di Carlo Beltrame e Salvatore Medaglia, altre indagini tecnico-scientifiche effettuate anche direttamente sui manufatti litici, come quelle stratigrafiche e minero-petrografiche hanno portato ovviamente ad integrare e ad ampliare in modo significativo molte precedenti informazioni e documentazioni, e a rettificarne alcune a suo tempo elaborate da Aquarius nel 1987. E' stato prodotto un nuovo rilievo più aggiornato. Inoltre con intenti sia didattici sia di sperimentazione, e solo su alcuni blocchi (per mancanza di tempo e di risorse), sono state realizzate delle applicazioni del metodo DSM, con misurazioni impostate appositamente per ottenere un ulteriore rilievo di carattere tridimensionale. In parallelo alle operazioni subaquee, ne sono state effettuate altre di documentazione presso il citato Museo Archeologico di Capo Colonna, su reperti ivi giacenti esaminandone alcuni di tipo metallico, altri fittili, altri ancora di tipo metallico e ligneo. All'interno di tali percorsi due nuovi fattori si sono rivelati determinanti:

- le mutate condizioni del sito che appariva più interrato di alcune decine di centimetri - rispetto al 1987 - talché alcuni blocchi risultavano occultati parzialmente, altri addirittura totalmente;
- il ritrovamento, durante il penultimo giorno di lavoro, di altri quattro blocchi, in posizione un po' distanziata e più vicina alla riva, che si ipotizza possano appartenere allo stesso carico. Date le condizioni meteomarine poco favorevoli e l'esiguità del tempo a

---

[93] AA.VV. 2013, p. 11 "… *nell'ambito del Progetto MiBAC Archeomar 1*".

[94] AA.VV. 2013, pp. 15-21. Il terzo capitolo *Le indagini: obiettivi e fasi operative*, redatto a cura di Carlo Beltrame, illustra il lavoro congiunto che fu prodotto dalle equipe universitarie veneziane (Ca' Foscari) e calabresi, con il coordinamento suo e di Salvatore Medaglia.

disposizione, non fu però possibile studiarli in modo adeguato e restano quindi oggetto di analisi che dovranno essere necessariamente approfondite[95].

Se dunque si può affermare che le ricerche sono lungi dall'essere esaustive, è certo che dei 58 manufatti lapidei che costituiscono il prezioso carico si possiedono all'oggi una quantità e qualità di dati tali da poter formulare delle ipotesi più attendibili sia sulla natura del carico: sua datazione, provenienza, consistenza volumetrica e valore economico; sia sulle dimensioni, caratteristiche e forma dell'imbarcazione che lo contenne e che naufragò in direzione sud-ovest rispetto al promontorio di Capo Pellegrino per motivi all'oggi ancora sconosciuti.

La disposizione dei manufatti marmorei *in situ* ha suggerito comunque una possibile ricostruzione sul tipo di impatto che l'imbarcazione potrebbe aver subito al momento del naufragio, la falla che automaticamente potrebbe essersi aperta sul suo lato orientale, il conseguente sbandamento e le modalità di fuoriuscita del carico con relativo suo adagiamento sul fondale. Tale ricostruzione resta comunque al momento solo una credibile ipotesi che dovrà essere eventualmente suffragata da ulteriori ricerche.

Il maggior carattere di scientificità che si è voluto imprimere a tutto il percorso, ha visto anche l'applicazione di criteri minero-petrografici sui singoli manufatti per ipotizzare età, provenienza e qualità del marmo[96], fino a determinarne il valore economico in rapporto alla cubatura, sulla base dei prezzi correnti dell'epoca rintracciabili nell'*Edictum de pretiis rerum venalium* di Dioclaziano[97]. Ecco una panoramica delle più recenti conclusioni:

- la data del naufragio con tutta probabilità risale alla prima metà del III secolo d. C.;
- i blocchi sono allo stato di semi-lavorazione, credibilmente per poterli meglio trasportare e stivare, forse per tale motivo non hanno dimensioni uniformi;

---

[95] AA.VV. 2013, p. 90, "*Ai quattro blocchi rinvenuti al di fuori del giacimento verso la riva sono state attribuite delle dimensioni di massima che portano ad un totale di circa 4 tonnellate*."

[96] AA.VV. 2013, p. 84-90, il decimo capitolo *Analisi minero-petrografiche*, ad opera del prof. Lorenzo Lazzarini, docente presso l'Università di Architettura di Venezia e direttore del Laboratorio di Analisi dei Materiali Antichi, presenta una dettagliata descrizione delle operazioni e dei risultati, ancorché limitati dato che le campionature sono state effettuate per ogni blocco, ma non tutte al momento sono state analizzate.

[97] AA.VV. 2013, p. 110, si veda il preziario ivi riportato.

- il carico, stante l'attuale numero di manufatti rinvenuti, verosimilmente doveva avere una lunghezza di 17 m e una larghezza di 12 m, un peso che si aggirava quasi sulle 350 tonnellate[98];
- il tipo di marmo di cui sono costituiti molti dei blocchi del carico è quello conosciuto come *marmor preconnesium* poiché proveniente dalle cave del Preconneso, nell'attuale isola di Marmara in Turchia, anzidetto *marmor cyzicenum* poiché all'epoca la locale città di Cizico esercitava il controllo sulle predette cave[99];
- i manufatti lapidei provengono da luoghi di estrazione diversi ovvero da cave isolane differenti, ma tutte appartenenti alla stessa circoscritta area geografica
- appare dunque verosimile che il carico giungesse dal mar Nero;
- i blocchi, così come disposti sul fondale, potrebbero suggerire il mantenimento di un assetto molto vicino a quello della fase di stivaggio, per cui è possibile che il carico si sia scomposto di poco;
- l'imbarcazione, una *lapidariae navis*, per via dello stivaggio, doveva essere sicuramente di tipo molto robusto e di notevoli dimensioni[100], in grado di garantire grande stabilità, ma comunque priva di caratteristiche specifiche, almeno nell'aspetto esteriore, che potessero renderla diversa dalle navi da carico e trasporto coeve;
- quanto alla propulsione, alcuni indizi fanno ritenere che avesse una sola vela e di piccole dimensioni, o che ne fosse priva addirittura, probabilmente sempre per fattori legati alla stabilità, tanto che tra le varie ipotesi è stata avanzata anche quella che fosse trainata e apparisse come una sorta di pontone da traino[101].

---

[98] BELTRAME,VITTORIO 2009, pp. 142

[99] AA.VV. 2013, p. 85-86, "…*questo stesso marmo è denominato marmo greco fetido dagli scalpellini romani rinascimentali perché emette gas solforati quando viene lavorato*."

[100] Sebbene non maggiori di quelle di altre navi *onerariae*, come sembra essere emerso dalle comparazioni con lunghezza e peso dei relitti navali di epoca romana, adibiti al trasporto di vino o di anfore in genere: BELTRAME,VITTORIO 2009, pp. 146.

[101] Cfr. BELTRAME, VITTORIO 2009, p. 146.

5.2 Tecniche di documentazione fotografica applicata

Al 1987 risale il rilievo speditivo dei blocchi di marmo, che costituiscono il carico naufragato, effettuato dalla cooperativa Aquarius in occasione della campagna di ricerche subacquee assegnatale (Fig. 5.2-1).

. Uno degli obiettivi della campagna del 2011 era la realizzazione di un nuovo rilievo, necessità indispensabile derivata dalla non corrispondenza di numerose misurazioni tra quelle effettuate nel 1987 con le nuove del 2011. La limitatissima disponibilità di finanziamenti, a discapito della durata della nuova campagna (8 giornate effettive dedicate alle operazioni in mare), ha imposto di escludere che il rilievo venisse effettuato attraverso il tradizionale metodo della trilaterazione; è stata quindi scelta una metodologia che permettesse la creazione di un fotomosaico del sito, con l'intento di poter poi ricavare da questo un disegno misurato; parallelamente sono state prese delle misurazioni che permettessero poi la realizzazione di un rilievo per trilaterazione tridimensionale attraverso il software *Site Recorder*, che non verrà però approfondito nel presente studio in quanto al di fuori del tema[102].

Per la realizzazione del fotomosaico si è scelto di seguire la metodologia 'a cime parallele' proposta da Bruce Hartzler per il relitto cipriota del IV secolo a.C. di Mazotos[103] (Cfr. § 2). A tale fine è stato costruito sul sito un telaio delle dimensioni di 19 x 19,5 m orientato a SE/NO, sul lato lungo. Ai quattro vertici e a metà di ogni lato sono stati infissi nel fondale, per 1 m circa di profondità, otto pali di acciaio inox a sezione quadrata (25 x 25 mm), usati come punti di appoggio. Ognuno di questi otto pali era a sua volta tenuto in trazione da due picchetti lunghi 1 m, con cavo di acciaio tensionato con tendi-cavo a cricchetto, infissi nel fondale. Un rettangolo quadripartito di filo di acciaio di 2,5 mm, teso fra i punti perimetrali, è stato poi posizionato a bolla, a 1,70 m di altezza dal fondale. Successivamente, come suggerito dalla tecnica utilizzata da Hartzler, sul lato lungo sono state tirate con del filo di nylon colorato e numerate con delle etichette, 13 corsie larghe 1,5 m (Fig. 5.2-2).

Costruito dunque il telaio, suddiviso in corsie, si è potuto procedere con l'esecuzione delle foto: è stata utilizzata una macchina fotografica scafandrata *Canon 450* con obiettivo *Sigma 10-20 mm*; allo scafandro è stata agganciata una bolla per semplificare e aumentare il grado di precisione

---

[102] Per approfondimenti riguardo al software *Site Recorder 4.0* di Peter Holt, consultare il sito del distributore *http://www.3hconsulting.com*

[103] DEMESTICHA 2011.

delle operazioni, aiutando il fotografo a mantenere lo strumento il più perpendicolare e orizzontale possibile. diverse, al fine di avere la possibilità di scegliere la soluzione più convincente al momento dell'assemblaggio a computer. Il primo giorno di riprese, seguendo dunque l'andamento dei cordini, un operatore ha effettuato le strisciate fotografiche inquadrando una corsia del telaio per volta, progredendo di circa 1 m da una foto scattata a quella successiva, cercando di mantenere un assetto costante a circa 2 m dal reticolo, quindi 3.70 m dal fondo (Fig. 5.2-3).

Il secondo giorno, operando con maggiore fedeltà rispetto alla tecnica proposta da Hatzler, le foto sono state effettuate sempre alla stessa quota del giorno precedente, ma facendo in modo di inserire tra una strisciata di una colonna e quella della corsia adiacente, una strisciata che fotografasse la parte in comune a cavallo tra le due, quasi raddoppiando così il numero totale di strisciate ottenute rispetto al giorno prima, con l'intento di offrire più elementi di sovrapposizione al fine di semplificare poi l'assemblaggio delle foto per il mosaico; il terzo giorno infine, sfruttando la buona visibilità dell'acqua e le dimensioni considerevoli dei soggetti fotografati, si è deciso di tentare delle strisciate fotografiche ad una quota superiore, cioè a 4 m dal reticolo, quindi a 5,7 m circa dal fondale, in modo che ogni scatto inquadrasse tre corsie di larghezza, per un totale di sole sei strisciate, avanzando sempre di 1 m tra uno scatto ed il successivo.

In un momento successivo, le foto delle strisciate sono quindi state rielaborate a computer per la realizzazione del fotomosaico. Dopo diverse valutazioni, si è scelto di lavorare con le strisciate ottenute durante il terzo giorno di riprese, quindi quelle che inglobavano tre corsie di larghezza, scattate da una quota più alta rispetto alle due giornate precedenti. Tale decisione è stata giustificata principalmente dalle dimensioni degli oggetti costituenti il carico interessato, ovvero blocchi di marmo di semplici forme di parallelepipedi che quindi non presupponevano una elevatissima necessità di dettaglio, al contrario di altri contesti archeologici quali anche un carico di anfore; anzi foto troppo ravvicinate, su oggetti di tali dimensioni e con forme così facilmente leggibili nel contesto, potevano essere addirittura controproducenti rispetto alla finalità del lavoro. Ci si è trovati così ad operare con un quantitativo di foto decisamente ridotto rispetto alle due alternative proposte, andando ad influire in modo decisamente positivo sulle tempistiche necessarie per portare a termine il lavoro.

Dopo questa prima scelta, è stato necessario operare una scrematura di tutte le singole foto così scattate, selezionando le migliori, che sarebbero dunque state quelle che, montate in modo consequenziale, avrebbero formato le sei strisciate costituenti il futuro mosaico. Con il criterio di "migliori" si intendeva scegliere quelle che risultavano scattate il più perpendicolarmente possibile al fondale (operazione non così semplice e scontata essendo eseguito il tutto in assetto

completamente libero e con elevata abilità da parte dell'operatore subacqueo) con un buon grado di leggibilità e con una sovrapposizione del 50% circa tra una foto e la sua precedente.

Sotto la guida di Hartzler stesso, con il software open-source *Hugin*, è stato possibile, per ogni strisciata, montare in modo consequenziale le singole foto: il procedimento prevedeva l'inserimento di tutte le foto di una singola serie (Fig. 5.2-4); tra queste necessitava poi fissare come 'ancora' l'immagine che nella successione si trova nel mezzo.

In seguito, con il comando apposito del programma, si è richiesto di creare in automatico tutti i punti di controllo possibili tra le varie foto[104]. Secondo la logica di *Hugin* bisognava poi assegnare delle lenti di visuale differenti alle varie foto, nello specifico una lente per quelle agli estremi, una lente per quella centrale (precedentemente fissata come 'ancora'), e un'altra ancora per le foto nel mezzo tra quelle agli estremi e quella mediana; questo avrebbe permesso di tenere una o più immagini ferme, correggendo le altre foto attorno a queste (Fig. 5.2-5)[105]; il passo successivo prevedeva infatti una serie di operazioni per ottimizzare al meglio i parametri X,Y e Z di tutte le immagini, rapportandole tra loro, selezionando in base alle necessità le varie lenti precedentemente assegnate: in questo modo anche se le foto non erano state perfettamente scattate perpendicolarmente al fondale, e quindi presentavano ognuna una angolazione leggermente diversa rispetto alle altre, era possibile eliminare gli errori di parallasse che altrimenti si sarebbero venute a creare semplicemente unendole; bisognava quindi cercare il miglior compromesso tra una buona sovrapposizione, sia per ridurre al minimo gli errori di parallasse sia perché risultasse esteticamente accettabile, producendo quindi una immagine che fosse il più piana possibile, senza curvature o deformazioni. Di caso in caso, pur mantenendo la medesima logica operativa, è stato inevitabile

---

[104] Nello specifico questo è reso possibile dal programma ausiliario *Autopano-Sift*, installabile direttamente dentro *Hugin*, nel caso in cui la versione del software a disposizione non lo contenga di default. Si suggerisce di impostarlo in modo che elabori minimo 10 punti di controllo per ogni coppia di fotografie. Non dimenticare però di ricontrollarli personalmente in quanto si è riscontrato che con la generazione automatica possono essere prodotti degli errori da parte del software, data la possibile somiglianza di alcuni punti.

[105] Harztler consiglia di assegnare un 'grado di vista' artificiale ad ogni immagine, del valore di 2 gradi. In questo modo *Hugin* considererà le immagini estremamente piccole. Giustifica la scelta dicendo che è un ottimo compromesso in quanto il programma considera questo valore così piccolo da evitare che si producano effetti di distorsione, ma sufficientemente grande da risultare adatto praticamente ad ogni tipo di lavoro. Hartzler spiega che bisogna pensare al soggetto che guarda come se stesse nel mezzo di una grande sfera, e il 'grado di vista' indica per *Hugin* quanto grandi, in gradi, sono le immagini sulla parete interna della sfera. Per un panorama normale, saranno mantenute con il reale 'grado di vista' in quanto saranno estese attorno a tutta la superficie interna della sfera, a 360°. Ma nel momento in cui sia ha la necessità di creare un piano, quindi piatto, è opportuno impostare il 'grado di vista' così piccolo da minimizzare ogni curvatura o deformazione data dalla forma della parete interna della sfera, utilizzando come piano di lavoro una porzione della superficie così piccola da risultare piatta.

procedere per tentativi in alcune fasi dell'opera. Ottenuto il risultato più gradito, *Hugin* ha poi offerto la possibilità di calcolare in automatico le dimensioni ottimali del campo inquadrato e dell'immagine, e di effettuare un ritaglio automatico per eliminare le porzioni dell'immagine in eccesso, determinate dalle inclinazioni delle varie fotografie. E' infine stato possibile esportare il lavoro così ottenuto in formato TIFF o JPEG.

Con questo procedimento sono dunque state prodotte le sei immagini delle sei strisciate nella loro interezza (Fig. 5.2-6).

Mediante la fusione di queste è stato possibile realizzare il fotomosaico generale (Fig 5.2-7). Per quanto riguarda questo procedimento, per il relitto di Mazotos, data la sua complessità, Hartzler aveva utilizzato tre diversi programmi di unione automatica, rispettivamente *Enblend*, *Smartblend* e *Adobe Photoshop CS'3 auto bland function*, selezionando di volta in volta il risultato più gradito e montando definitivamente il tutto con *Photoshop* (Cfr §1, p. X). Per il presente studio è stato scelto invece, per praticità e velocità, di unire direttamente le 6 strisciate con *Photoshop*, ma procedendo manualmente, aggiungendone una per volta, creando vari layer differenti, accostandole e sovrapponendo le parti in comune, selezionando le angolazioni migliori, fino ad ottenere il mosaico finale dell'intero sito. Ciò è stato ovviamente reso possibile dal fatto di lavorare con strisciate che non differivano eccessivamente tra loro nei punti di sovrapposizione, con angolazioni molto simili, presentanti oggetti di forme definite e chiaramente leggibili, privi di particolari minuti o numerosi da far collimare insieme, permettendo quindi di operare tranquillamente a mano. Infine, a quadro completo, sono stati apportati degli accorgimenti prettamente estetici, quali la correzione manuale di quei piccoli errori di sovrapposizione derivati da *Hugin*, che il software non era riuscito a calcolare correttamente, la regolazione del contrasto e il bilanciamento dei colori, per conferire maggiore uniformità al prodotto.

Una valida soluzione, spesso utilizzata per le foto archeologiche di documentazione, può essere quella di 'eliminare' i colori, e presentare la foto nella tonalità della 'scala di grigi'[106] (Fig. 5.2-8). In alcuni casi i colori potrebbero risultare addirittura fuorvianti per la lettura dell'immagine, o comunque non attendibili. Inoltre la foto in bianco e nero, nel caso in cui ci si trovi davanti ad un sito costituito da un carico di marmi, come quello in oggetto, può risultare meglio interpretabile, in quanto sicuramente presenta un contrasto più evidente rispetto alla copia a colori.

Con il software *Autocad* è stato poi possibile mettere in scala il fotomosaico, importando l'immagine raster. Non essendo però l'immagine di per sé in scala, si è dovuto procedere scalandola rispetto a punti noti, e questo è stato possibile grazie alla conoscenza delle misure reali dei blocchi di marmo.

---

[106] BOWENS 2009, p. 77.

Tramite *Gimp*, programma gratuito per creazione e modifica di immagini digitali, in genere considerato un'alternativa al più famoso *Adobe Photoshop*, si è potuto inserire nel fotomosaico dei dettagli significativi: è stata disegnata la scala metrica, precedentemente ricavata con *Autocad*; è stato inserito il numero corrispondente ad ogni blocco evidente, mantenendo la stessa numerazione che era stata adottata da Aquarius; infine è stata disegnata la freccia del Nord geografico, per permettere di orientare il sito (Fig. 5.2-9).

Il programma *Adobe Illustrator* infine ha permesso di ricavare il lucido digitale dal fotomosaico (Fig. 5.2-10). Per una scelta estetica, su un livello creato al disotto del lucido, è stato assegnato un colore che ricreasse l'effetto sabbia del fondale. Da notare che si è rispettata, cioè rappresentata, la copertura della sabbia, quando ricopriva, anche parzialmente, i blocchi, esattamente come è possibile vedere nell'immagine originale del fotomosaico.

Per eseguire una comparazione con il vecchio rilievo disegnato dalla cooperativa Aquarius, al fine di poter notare anche a livello grafico le divergenze tra le misurazioni prese, si è scelto di eseguire una sovrapposizione del recente mosaico al rilievo del 1987 (Fig. 5.2-11). Questo è stato possibile operando con *Photoshop* delle roto-traslazioni del mosaico, con relativa scalatura, sul raster del rilievo, opportunamente caricato su di un layer sottostante. Per meglio adattare le due immagini, sono stati ritagliati singoli particolari dalle foto ed incollati sul fotomosaico, laddove le divergenze erano eccessive, determinate dai possibili adattamenti per correggere gli errori di parallasse nella costruzione del mosaico, combinati a possibili errori di misurazioni effettuate dalla cooperativa Aquarius.

6. IL CASO STUDIO DEL RELITTO DI XI-XII SECOLO d.C. DI MLJET

6.1 Storia delle ricerche

Il relitto giace nelle vicinanze di Capo Stoba, nelle acque dell'isola croata di Mljet conosciuta in Italia come Isola di Meleda. La nave mercantile con probabilità affondò in questo punto tra l'XI ed il XII secolo nel tentativo di entrare nella baia protetta del vicino villaggio di Okuklje. Non riuscendo nell'impresa naufragò, disperdendo sul fondale digradante un carico costituito di oggetti in vetro e diverse tipologie di anfore probabilmente vinarie, ad una profondità compresa tra i 20 ed i 30 metri circa[107].

Il giacimento fu scoperto agli inizi degli anni '60 da subacquei locali, e presto fu attuata una rimozione di anfore e altri oggetti di valore. Le prime indagini di esperti furono condotte solo nel 1975, da parte del Museo Marittimo di Dubrovnik e dell'Istituto per la Conservazione dei Beni Culturali della Repubblica Croata. A seguito dei precedenti asporti, il sito appariva ormai devastato e gli unici reperti rimasti *in situ* erano frammenti di oggetti in ceramica e in vetro[108]. Tuttavia Zdenko Brusić, appartenente al team di ricerca, riuscì ad utilizzarli, insieme a foto e misure delle anfore già rimosse - confrontandole anche con altri reperti anforari noti dello stesso periodo - per proporre una classificazione in cinque gruppi delle anfore bizantine dell'Adriatico Orientale[109].

Il sito fu indagato nuovamente solo a partire dal 2006, in occasione delle ricognizioni condotte lungo la costa centrale e meridionale della Dalmazia, a cura del Dipartimento di Archeologia Subacquea del Ministero dei Beni Culturali.

Nel 2009, per riesaminare le condizioni del giacimento, il Dipartimento stesso decise di intraprendere un'altra campagna di scavo che, tra gli altri, vide il ritrovamento di un'anfora integra e ancora sigillata con un tappo di legno. Il prezioso reperto, caratterizzato dalla tipica forma bizantina con solcature orizzontali e parallele realizzate al tornio, venne identificato subito come appartenente al *gruppo 1* della classificazione proposta da Brusić, probabilmente databile al IX-X secolo d. C., e

---

[107] ZMAIĆ 2012, pp. 472-473.

[108] ZMAIĆ 2011, pp. 94-95.

[109] BRUSIĆ 1976, pp. 37-49.

forse proveniente dall'area del Mar di Marmara[110]. Il ritrovamento di questa anfora integra ha permesso di dedurre che nel sito vi fosse almeno un altro strato ancora intatto di reperti e ha fornito la base per ipotesi su come fosse stato stivato il carico nella nave. I frammenti ritrovati invece nello strato superficiale sono risultati simili a diversi esemplari, datati tra IX e XI secolo d. C., provenenti da numerosi siti individuati presso le coste del Mar di Marmara, nell'area del Ponto, in Ucraina, in Bulgaria ed in Romania. Durante la stessa missione del 2009, sono inoltre stati identificati i resti di altre anfore piriformi, simili ad esemplari datati tra X e XII secolo d. C. e oltre. Oltre ai reperti in ceramica, molto numerosi si sono rivelati i manufatti in vetro, costituiti prevalentemente da coppe, bicchieri, bottiglie e ciotole, provenienti dall'area orientale del Mediterraneo. La caratteristica decorazione "ad occhio", in essi presente, era tipica del mondo Islamico e delle zone ai confini orientali dell'Impero Bizantino, e tra il IX ed il X secolo d. C. si diffuse anche tra i laboratori che lavoravano il vetro nella stessa Bisanzio. Uno dei frammenti rinvenuti nel carico di Mljet presentava una incisione tipica delle comunità cristiane di Siria e Mesopotamia, che ha permesso di attribuirne la produzione a queste aree e forse la provenienza commerciale da Bisanzio[111].

Nel 2010 si diede avvio ad una nuova campagna di ricerca ad opera del Dipartimento di Archeologia subacquea dell'Istituto per il Restauro di Zagabria, in cui lo scavo venne condotto attraverso l'utilizzo di sorbone ad acqua e fu prodotta una documentazione grafica con il metodo della triangolazione.

Nel 2011 si procedette ancora con lo scavo per mezzo delle sorbone ad acqua e una griglia metallica rigida posizionata sul fondo per supportare le operazioni di documentazione.

Nel 2012 infine, fu condotto un ulteriore scavo archeologico subacqueo in collaborazione tra il dipartimento di Studi Umanistici dell'Università Ca' Foscari di Venezia e l'Istituto per il Restauro di Zagabria, con l'aiuto di subacquei provenienti dalle forze speciali della polizia croata e dal nucleo dei vigili del fuoco di Zagabria, ed il supporto tecnico dei diving center MM-Sub e Aqatica Mljet. Per le immersioni furono utilizzate miscele iperossigenate con percentuale di ossigeno al 36%, al fine di garantire tempi più elevati di operatività sul fondo. Quattro sorbone ad acqua furono

---

[110] Le anfore più simili a questo esemplare sono state rinvenute nella zona di Istanbul chiamata Mangala e datate a partire dal IX secolo d. C.; un'altra ancora, preservata solo nella porzione superiore, è stata ritrovata nel XIV strato dell'Agorà di Atene, e datata tra il IX ed il X secolo d. C.; infine sei anfore molto simili provenienti dal relitto di Serçe Limani, inizialmente datate all'XI secolo d. C., si è scoperto che venivano riutilizzate come contenitori da trasporto anche a molta distanza dalla fabbricazione, motivo per cui la loro datazione è stata anticipata, risultando quindi più antiche del relitto stesso. Dallo studio dei graffiti incisi su queste sei anfore, si è ricostruito che esse provenivano probabilmente dalla regione del Mar di Marmara, e quindi, data la somiglianza, anche quella ritrovata sul relitto di Capo Stoba potrebbe giungere da questa stessa zona. ZMAIĆ 2011, p. 95.

[111] ZMAIĆ 2011, p. 97.

impiegate contemporaneamente per effettuare lo scavo e, come metodo di documentazione, si scelse di realizzare una fotogrammetria del sito per ottenerne una restituzione tridimensionale, sfruttando il telaio metallico a disposizione.

Il relitto di Capo Stoba presso l'isola di Mljet è di estremo interesse in quanto è uno dei pochissimi, per la precisione soltanto tre, del periodo bizantino-medievale sino ad ora rinvenuti nell'Adriatico Orientale. E' inoltre quello più antico e l'unico di quell'epoca tra questi, in quanto degli altri due, quello situato nella baia di Nin è databile a partire dal XII secolo d. C. mentre l'altro, databile tra XII e XIII secolo d. C., è situato presso l'isola di Merara. Ne consegue che il relitto di Capo Stoba è importantissimo anche per lo studio e la conoscenza delle rotte marittime di epoca medioevale, ed in particolare di quelle dalla città di Costantinopoli, nel momento in cui Venezia arrivava ad estendere completamente il suo controllo sull'Adriatico[112].

[112] Carlo Beltrame, *Lo scavo e la documentazione del relitto di XI secolo dell'isola di Mljet (Meleda): rapporto preliminare*, Venezia, 2013.

6.2 Tecniche di documentazione fotografica applicata

La prima fase ha riguardato la realizzazione di un telaio metallico rigido che è stato costruito sul fondale per suddividere in quadranti l'area di scavo secondo il sistema della quadrettatura. La struttura formava così un reticolo di 3 quadrati, aventi dimensione di 2 m ciascuno, per ogni lato del telaio. Poiché il sito giace su un fondale inclinato, esso è stato ripartito in nove quadranti, tre dei quali - quelli costituenti la prima fila – posti ad una profondità superiore rispetto agli altri sei che, disposti sulle altre due file, erano invece alla medesima altezza (Fig. 6.2-1). Attraverso una livella a bolla è stato possibile mettere correttamente in piano l'intera struttura. Sul sito sono poi stati distribuiti dei "punti di appoggio", in forma di mire, che sono stati tutti quotati con l'ausilio di un metro posto perpendicolarmente ad essi, rilevando la misura battuta all'altezza del telaio. La fotogrammetria che è stata poi realizzata, anche in questo caso, come per il relitto del *Mercurio*, è stata di tipo "non convenzionale" in quanto le riprese dei fotogrammi sono state eseguite con una comune fotocamera subacquea. Di conseguenza, non essendo noti da principio i parametri di orientamento interno, si è dovuto calcolarli a posteriori con il processo dell'autocalibrazione a partire dalle coordinate dei "punti di appoggio" noti. La procedura per ottenere questo rilievo è stata sviluppata però in modo ben diverso rispetto a quella attuata per il relitto ottocentesco poiché gli scatti sono stati eseguiti in assetto libero: gli assi delle prese fotografiche non risultavano dunque paralleli tra loro e perpendicolari alla loro base di ripresa e la lunghezza focale non è stata mantenuta sempre costante; ciò ha impedito di utilizzare da principio la metodologia dello "schema normale" o "schema nadirale" che invece necessita proprio di questi requisiti.

Passando dunque alla seconda fase, secondo i principi della fotogrammetria, i quali richiedono che l'oggetto sia ripreso da punti di vista differenti, ogni quadrante è stato fotografato da tre angolazioni diverse (Fig. 6.2-2).

Nella successiva fase di rielaborazione, dato che i fotogrammi avevano riportato delle notevoli distorsioni, generate dall'obiettivo non professionale della macchina fotografica, è stato necessario effettuare un fotoraddrizzamento (Fig. 6.2-3) che è stato appunto realizzato con l'utilizzo del software *Fotoraddrizzamento*[113].

Ad ogni immagine è stata applicata una "correzione ottica a tre punti in linea", per eliminare la "distorsione a barilotto", cosicché i lati del telaio - che altrimenti sarebbero apparsi curvati - sono stati trasformati in linee rette. Il programma esigeva che fossero individuati tre punti

[113] MANTINI 2007.

giacenti su una stessa retta che poi il software avrebbe allineato correttamente una volta identificati nell'immagine: conoscendo le dimensioni dei riquadri del telaio, di 2 m per lato, è bastato inserire come coordinate le due estremità di un lato e il punto mediano, collocati rispettivamente a 0, 100 e 200 cm. Successivamente, poiché gli scatti erano stati eseguiti da angolazioni differenti e le fotografie non risultano mai riprese perpendicolarmente al telaio, per raddrizzarle in modo che i lati del quadrante risultassero ad angolo retto, è stato necessario eseguire una "proiezione omografica a otto parametri". Per individuarli si è così proceduto: dal momento che nella realtà il quadrante del telaio corrisponde alla figura geometrica del quadrato, è stato possibile individuare sia le lunghezze dei quattro lati, tutti ovviamente di 200 cm, sia i quattro vertici che, congiunti con il programma *Fotoraddrizzamento*, hanno prodotto un quadrilatero. Il software lo ha raddrizzato in modo che risultasse un quadrato, come se tutti i fotogrammi fossero stati scattati con il piano di ripresa parallelo al telaio. Dovendo però tenere presente che il fondale è inclinato e non parallelo alla struttura, il fotoraddrizzamento così prodotto era da riferire al piano dei riquadri e non al piano su cui giacciono i reperti.

Nella fase seguente, con il software di grafica vettoriale *Corel Draw* si è aperto un foglio di lavoro sul quale è stata disegnata una griglia per riprodurre in scala il telaio suddiviso nei nove quadranti.

Un fotogramma a scelta, precedentemente raddrizzato, è stato sovrapposto al disegno in modo che il quadrante ritratto nell'immagine combaciasse con il riquadro corrispondente della griglia (Fig. 6.2-4).

Una volta raddrizzata la fotografia, poiché eseguita in assetto libero e non perpendicolarmente al telaio, risultava che il centro ottico non corrispondeva più al centro del fotogramma. Problemi di questo tipo è possibile risolverli graficamente se si dispone nell'immagine di elementi verticali, intersecandone i prolungamenti. Gli unici elementi presenti nelle fotografie che potessero assolvere a tale compito erano le paline montate verticalmente in alcuni punti del telaio, sebbene non perfettamente dritte, ed i tubi sporgenti della struttura, anche se di lunghezza un po' esigua per disporre di un prolungamento adeguato. Altra soluzione economica e più precisa avrebbe potuto essere quella di fissare ad ogni angolo di ciascun quadrante una piccola sagola mantenuta in tensione e in assetto verticale da un galleggiante, tecnica attuabile solo in contesti privi di correnti marine come nel caso del sito in questione Ne è conseguito che le quattro rette tracciate non si sono intersecate in un punto unico. Si è allora individuato il centro del poligono generato da queste intersezioni assumendolo come centro ottico planimetrico, con un grado di errore accettabile per lo studio in corso (Fig. 6.2-5).

Per avere una migliore conduzione del lavoro si è deciso di ridurre di dieci volte la dimensione dei fotogrammi, per poterli gestire tutti contemporaneamente, eliminando la possibilità di sovrapposizioni e visualizzandoli tutti insieme sul desktop senza la necessità di spostare continuamente le barre di scorrimento per cambiare la porzione inquadrata. Non si è però trattato di una semplice riduzione delle immagini, poiché il software le avrebbe scalate centrandole sul centro delle fotografie e non sul loro centro ottico, provocando la perdita della posizione corretta rispetto alla griglia. Per ovviare a ciò, attorno ad ogni fotogramma è stata disegnata una circonferenza, avente centro nel centro ottico dello scatto fotografico; la circonferenza, con al suo interno la foto, è stata interpretata dal programma come un oggetto unico e rimpicciolendola è stata ridotta sul suo centro, coincidente dunque con il centro ottico del fotogramma, mantenendo così i giusti rapporti di questo con la griglia (Fig. 6.2-6).

Tutte le fotografie sono state caricate sul foglio di lavoro e trattate con la medesima rielaborazione (Fig. 6.2-7).

La restituzione planimetrica è stata poi realizzata, con lo stesso procedimento usato per il *Mercurio*, disegnando le linee passanti tra i centri ottici delle immagini ed i punti omologhi da rilevare: le intersezioni prodotte hanno generato una planimetria in scala dei punti dei reperti fotografati (Fig. 6.2-8). Per ogni anfora rilevata, costituente il carico del relitto, sono stati individuati almeno due punti alle estremità del reperto, uno sull'orlo ed uno sul puntale è stato il caso più frequente, al fine di individuarne il corretto orientamento.

Parallelamente, attraverso il software di grafica tridimensionale *Rhinoceros,* è stato disegnato un modello in scala per ogni tipologia di anfora ritrovata. Dalle fotografie dei reperti, effettuate durante la campagna di scavo, sono state ricavate le *texture* da applicare a queste ricostruzioni virtuali rendendole così più realistiche[114].

Poiché non tutte le anfore sono state rinvenute integre, per ogni reperto rilevato sono state ritagliate le porzioni corrispondenti partendo dai modelli interi.

Nel disegno elaborato con *Corel Draw*, costituito dai punti ottenuti dalle varie intersezioni, sono state collocate a livello planimetrico le ricostruzioni tridimensionali dei singoli reperti (Fig. 6.2-9).

La restituzione altimetrica è stata sviluppata con una tecnica mista utilizzando il procedimento analitico delle equazioni di collinearità precedentemente descritto per la determinazione delle quote del relitto del *Mercurio*, integrato con un processo elaborato graficamente per ogni fotogramma. La necessità di questa particolare soluzione è derivata dalle condizioni iniziali già spiegate, ovvero sia dal fatto che la lunghezza focale utilizzata per le riprese

---

[114] Le informazioni sono state personalmente fornite da Elisa Costa che ha curato tali ricostruzioni.

fotografiche non era nota, sia dalla pendenza del piano reale su cui giacevano le mire, cioè il fondale, non parallelo al piano dei riquadri sul quale è stata calcolata la planimetria. La lunghezza focale in questo caso non era costante ed ha richiesto pertanto di essere calcolata per ogni immagine, così come le coordinate del centro ottico, in quanto gli scatti sono stati eseguiti in assetto libero; di conseguenza anche le equazioni di collinearità per ogni immagine sono state scomposte e risolte per reiterazioni. L'inclinazione del piano delle mire comporta che nella trasformazione dal bidimensionale al tridimensionale si verifichi un diverso rapporto di aumento delle lunghezze delle rette passanti tra i centri ottici delle immagini ed i punti omologhi rilevati all'interno di uno stesso fotogramma. Tale aumento può essere determinato controllando la lunghezza del segmento a livello planimetrico e calcolandone la percentuale di incremento secondo la misura della quota di ogni punto registrata durante lo scavo (Fig. 6.2-10).

Ottenuti tutti i riferimenti altimetrici del sito, ancora con l'ausilio di *Rhinoceros*, è stato possibile restituire il rilievo tridimensionale nella sua totalità, potendo collocare correttamente nello spazio i modelli virtuali di anfore precedentemente sviluppati (Fig. 6.2-11)[115].

---

[115] La restituzione tridimensionale, effettuata da Elisa Costa, è stata qui riprodotta su sua gentile concessione.

7. CONCLUSIONI

Nel lavoro in oggetto si è analizzato come, in archeologia subacquea, ogni tecnica utilizzata per la registrazione della documentazione, quella fotografica in particolare, sia strettamente determinata dalla logica costi/benefici allo scopo di ottenere i migliori risultati possibili compatibilmente con il tempo, i fondi e le varie risorse umane a disposizione adeguatamente coniugati con le condizioni ambientali e naturali proprie del sito da indagare.

In ognuno dei tre casi studio presentati, relitto del *Mercurio* del 1812, relitto *Punta Scifo D* del III secolo d. C. e relitto di XI-XII secolo d. C. di Mljet, si è deciso di operare con una macchina fotografica amatoriale, non solo per gli elevati costi delle macchine metriche o semimetriche ma anche per la difficoltà nel procurare scafandri idonei per impermeabilizzarle. La scelta di impiegare apparecchiature economiche, facilmente reperibili ed utilizzabili da chiunque, ha automaticamente implicato la necessità di aumentare il tempo da dedicare alla fase di rielaborazione dovendo calcolare i parametri di orientamento interno che nelle macchine metriche sarebbero stati noti fin da principio. Per il *Mercurio* inoltre vi è stato un passaggio ulteriore poiché, in base alle attrezzature a disposizione, nelle varie campagne di scavo, ad eccezione delle ultime due, è stata utilizzata una macchina analogica che ha comportato l'allungamento dei tempi di lavoro per la digitalizzazione di ogni negativo con uno scanner ad alta risoluzione.[116]

Per sintetizzare e mettere a confronto le metodologie seguite nei tre casi studio, può essere utile una panoramica dei parametri che ogni volta sono stati considerati. Per il *Mercurio*:

- Lo scafo da documentare in tutte le componenti costruttive, attrezzature ed equipaggiamenti, insieme ad una gran quantità di oggetti legati alla vita di bordo, presentavano una ricchezza tale di dettagli da richiedere un accurato rilievo plani-alimetrico: si è perciò proceduto con il processo fotogrammetrico.
- Il processo richiedeva la scelta di una metodologia applicativa ed essendo la prima volta che l'equipe incaricata si misurava con tale procedimento, ha deciso di propendere per una soluzione che soddisfacesse i requisiti convenzionali per cui gli scatti sono stati effettuati tutti dallo stesso piano di ripresa, mantenendo l'asse ottico dell'obiettivo perpendicolare al piano, e con una sovrapposizione del 50% di ogni scatto con quelli adiacenti. Ovviamente

[116] Passaggio ormai superabile grazie alle fotocamere digitali con le quali si possono risparmiare tempo e risorse finanziarie eliminando l'onere di spesa per le elevate quantità di pellicola e i conseguenti sviluppi fotografici.

per coerenza metodologica si è continuato ad operare nello stesso modo in tutte le missioni successive.

- La visibilità media riscontrata sul sito, generalmente scarsa, ha impedito di effettuare riprese ad una altezza superiore ai 2,5 metri, pena la perdita di dettagli rilevanti. Ciò ha comportato svantaggio temporale (ed economico nelle campagne in cui è stato impiegato l'analogico) dovendo eseguire e, in fase di rielaborazione trattare, un quantitativo superiore di fotografie rispetto a quello che sarebbe stato prodotto con una migliore trasparenza dell'acqua; si è avuta però maggior precisione nella restituzione delle immagini grazie al fatto di aver operato con un basso fattore di scala tra l'area reale e le dimensioni del fotogramma; con il vantaggio di ridurre al minimo gli errori dovuti alle distorsioni alle quali sono soggette le fotocamere, in particolare quelle non professionali.
- Il sito disposto su un fondale pianeggiante presentava caratteristiche intrinseche in grado di agevolare le operazioni fotogrammetriche.
- Il telaio rigido, poggiante su quattro montanti, costruito sul fondo, è stato attrezzato con un binario mobile, su cui scorreva un carrello con fissata la macchina fotografica, avente l'obiettivo perpendicolare rispetto al piano dei punti di ripresa. Ciò ha consentito di ottenere delle fotografie pronte da utilizzare senza dovervi dedicare particolari correzioni in fase di rielaborazione. Però non riuscendo il telaio a coprire tutta l'area interessata, era necessario riposizionarlo su ogni quadrante in cui era diviso il sito, reimpostandolo ogni volta in modo tale che risultasse livellato a bolla. E questo ha causato un certo dispendio di tempo nelle operazioni subacquee per il montaggio della struttura, i suoi spostamenti e raddrizzamenti, nonché l'impiego di un minimo di due sommozzatori. Procedura compatibile con il fatto che, non avendo studiato il sito nella sua interezza in una unica campagna, ci si è potuti concentrare ogni volta su delle porzioni riguardanti aree di scavo di dimensioni non eccessive.

Il rilievo così prodotto per il *Mercurio* può dirsi di ottima qualità in quanto rispettoso di un alto grado di precisione, congruo con la natura dei suoi reperti, e altresì aderente a tutte le caratteristiche di documentazione di un sito sia per una visione planimetrica, sia - all'occorrenza - per una conoscenza altimetrica. Le fotografie infatti hanno il pregio di poter essere riutilizzate, se necessario, per creare un fotomosaico dell'area di scavo, in quanto soddisfano i requisiti richiesti anche per quest'ultimo (Cfr. § 2) sebbene, la fotogrammetria fornisca già di per sé le informazioni planimetriche.

Per quanto riguarda invece il rilievo prodotto per il carico di marmi del relitto *Punta Scifo D*, la scelta della metodologia ha seguito linee affatto diverse:

- La natura del carico, composto soltanto da blocchi di pietra e di marmo di notevoli dimensioni e tutti di forme geometrizzanti, privo quindi di particolari dettagli, ha comportato un grado di precisione che poteva essere non millimetrico, facilitando le operazioni di ripresa.
- La disponibilità dei finanziamenti era limitatissima e di conseguenza i tempi da preventivare per le operazioni subacquee dovevano essere molto ristretti.
- La decisione di produrre un rilievo per trilaterazione tridimensionale con l'utilizzo sperimentale del software *Site Recorder*, ha reso superflua la realizzazione, anche attraverso tecniche fotografiche, di un ulteriore rilievo con informazioni plani-altimetriche; si è dunque abbandonata l'idea di produrre una fotogrammetria del carico, e si è optato per la realizzazione di un fotomosaico, sufficiente per avere una visione d'insieme dell'area indagata.
- La visibilità molto buona ha permesso operazioni fotografiche a distanze superiori ai 5 metri circa, con la possibilità di inquadrare in ogni fotogramma porzioni ampie del giacimento; se così facendo si è abbassata la qualità del dettaglio, si è anche ridotto il numero degli scatti, con il vantaggio di risparmiare tempo sia nell'esecuzione sul campo sia nell'elaborazione successiva.
- La profondità, contenuta tra 6 e 7 metri, ha agevolato le operazioni, soprattutto concedendo tempi di immersione prolungati che hanno consentito di realizzare la copertura fotografica dell'intero sito in un'unica immersione da parte di un solo operatore.
- Il giacimento disposto su un fondale pianeggiante concordava con i requisiti tecnici indispensabili per lo sviluppo del fotomosaico (Cfr. § 2).
- La realizzazione del fotomosaico, in ossequio a quanto sopra riportato, ha previsto che l'operatore eseguisse le strisciate fotografiche nuotando in assetto libero, sopra a corsie "guida" costituite da cime stese parallelamente sopra il sito, secondo la tecnica proposta da Bruce Hartzler sul relitto cipriota del IV secolo a.C. di Mazotos (Cfr. §2).

La metodologia prescelta si adatta perfettamente a situazioni in cui è importante la rapidità delle operazioni subacquee tanto che su di un sito delle dimensioni quali quelle in questione, due sole giornate di lavoro sono state sufficienti rispettivamente per l'allestimento delle corsie e per lo

smontaggio[117]; per le strisciate fotografiche è bastato un unico operatore subacqueo, in grado di terminarle in poche ore di lavoro; inoltre le spese per l'acquisto dei materiali necessari per l'allestimento del campo sono state più che ragionevoli, compatibili con un "low budget". Di contro è emerso l'inconveniente non trascurabile di aver prodotto fotografie effettuate non tutte dallo stesso piano di ripresa nonostante si sia tentato di mantenere l'asse ottico dell'obiettivo il più perpendicolare possibile al piano con l'ausilio di livelle a bolla agganciate alla macchina[118].

Si può dunque concludere che il rilievo di *Punta Scifo D* abbia dato un risultato finale accettabile, anche se non strettamente preciso, ma comunque adeguato per fornire una visione generale del sito. Rappresenta infatti un buon compromesso tra le risorse a disposizione, la situazione del sito e gli obiettivi da raggiungere.

Infine la tecnica fotografica sperimentale utilizzata per rilevare il relitto di XI-XII secolo d. C. dell'isola di Mljet è stata determinata dalle seguenti condizioni:

- Il numero considerevole di anfore sia integre sia frammentate presupponeva un altissimo grado di precisione nel rilievo dei dettagli, si è scelta perciò la tecnica fotogrammetrica atta a fornire un rilievo tridimensionale di tutta l'area.
- Il fondale presentava un accentuato grado di pendenza per cui le altezze dei singoli reperti risultavano a livelli assai differenziati.
- La profondità era elevata, essendo il giacimento disposto tra 25 e 30 metri, e ciò ha implicato tempi di permanenza sul fondo limitati per ogni singola immersione.
- La cooperazione tra l'equipe veneziana e quella croata ha offerto la presenza di un considerevole numero di operatori che, avvicendandosi nelle immersioni durante l'arco di ogni giornata, hanno comunque garantito una elevata continuità di lavoro sul fondo.
- L'ottima visibilità ha contribuito a facilitare le operazioni di ripresa.
- L'equipe croata ha provveduto a costruire sul fondo un telaio metallico rigido e fisso che copriva l'intera area di scavo dividendola in quadranti; in base alle premesse sopra elencate e alle attrezzature disponibili, si è deciso di sperimentare una tecnica attuabile da un singolo operatore, in assetto libero, in grado di effettuare delle riprese fotografiche in tempi decisamente brevi, con la consapevolezza di dover comunque preventivare tempistiche maggiori per la fase di rielaborazione digitale. La griglia posizionata sul sito fungeva da

---

[117] Basti pensare che la costruzione di un telaio rigido, come quello utilizzato ad esempio per il relitto bizantino di Yassi Ada, implica di per sé vari giorni di lavoro. BASS 1970, p.109.

[118] L'avvento del computer e del digitale ha permesso di ovviare a ciò sebbene con tempi di rielaborazione dei file sensibilmente lunghi.

punto di riferimento per gli scatti fotografici, eseguiti catturando un quadrante intero in ogni fotogramma.

- L'alto grado di trasparenza dell'acqua ha permesso riprese sufficientemente distanziate, cosicché per ogni reperto, sono state prodotte fotografie che, pur non dettagliate nei minimi particolari, hanno fornito per ogni oggetto i dati topologici fondamentali per la successiva ricostruzione tridimensionale sviluppata con il software *Rhinoceros* di grafica 3D.
- La pendenza del fondale ha comportato che il piano di quest'ultimo non fosse parallelo a quello della struttura e, poiché gli scatti erano stati eseguiti in assetto libero, non soddisfacevano assolutamente i requisiti standard per l'esecuzione della fotogrammetria (cfr. § 3). Il concetto sotteso all'estrapolazione della fotogrammetria dai singoli scatti è lo stesso su cui si basa la procedura attuata per il *Mercurio*, con la notevole differenza però che nel caso croato è stato necessario prima di tutto raddrizzare ogni singola fotografia e di conseguenza ricalcolarne il centro ottico per poi poterla posizionare in scala, in rapporto corretto con le altre e con la griglia del telaio.

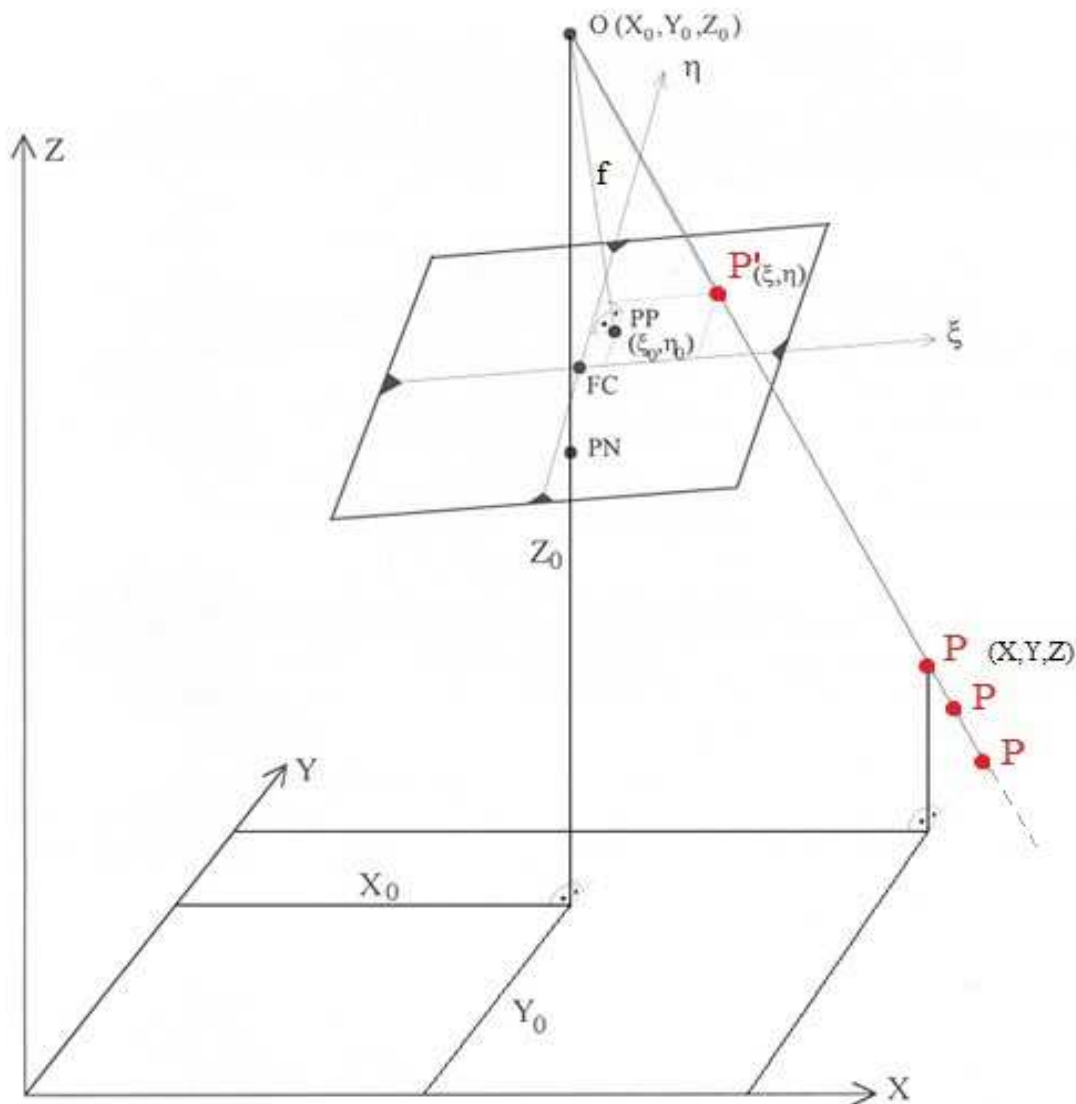
Le fotografie prodotte per il relitto di Mljet, per la modalità con cui sono state scattate e per le conseguenti caratteristiche, a differenza di quelle realizzate per il *Mercurio*, non potrebbero assolutamente essere utili per la produzione di un fotomosaico.

La tecnica impiegata, seppur particolare e dispendiosa a livello di tempistiche di rielaborazione, è stata comunque valida per giungere all'obiettivo finale di fornire informazioni sufficienti sui singoli reperti al fine di poter produrre una accurata elaborazione tridimensionale.

Proponendo una valutazione sulle tre tecniche prese in esame, un confronto diretto potrebbe essere portato tra quelle utilizzate rispettivamente per il *Mercurio* e per relitto di Mljet, in quanto entrambe hanno prodotto una rielaborazione fotogrammetrica, mentre sarebbe una forzatura confrontare quest'ultime con quella impiegata a *Punta Scifo D* che ha invece avuto finalità completamente diverse limitandosi allo sviluppo del solo fotomosaico. Delle prime due, quella adottata sul relitto ottocentesco ha preferito seguire una linea che portasse a spendere maggior tempo sul campo, seguendo standard tradizionali, riducendo poi i tempi di rielaborazione; la seconda al contrario ha dovuto optare per tempistiche minori nella fase pratica e più lunghe in quella successiva. Sicuramente entrambe hanno comunque portato al raggiungimento dei risultati attesi. Si potrebbe osservare che nel caso del *Mercurio* una soluzione più agevole avrebbe potuto essere rappresentata da una struttura più flessibile, magari del tipo "bipiede" come quella suggerita da Green, che avrebbe sicuramente velocizzato alcuni passaggi e reso più facili gli spostamenti e i

riposizionamenti della struttura. Nel caso del Mljet invece, pensando di ripetere l'esperienza di scavo, potrebbe essere opportuno riservare più attenzione, durante le operazioni subacquee, al posizionamento degli elementi verticali che sono stati posti su ognuno dei quadranti. Ciò per fare in modo che siano ben visibili nelle fotografie e, in fase di rielaborazione, intersecandone i prolungamenti, per facilitare l'individuazione del loro centro ottico. Gli unici elementi presenti in questo caso che potessero assolvere a tale compito erano le paline montate verticalmente in alcuni punti di intersezione del telaio, purtroppo non perfettamente dritte, il che ha causato la necessità di una approssimazione, che comunque si è mantenuta accettabile, per il calcolo del centro ottico.

Se è vero che ad un lavoro di rilievo al quale si è potuto dedicare poco tempo in fase operativa sarà necessario riservare più tempo in fase di rielaborazione, e viceversa, così come ad una tecnica speditiva seguirà ovviamente un prodotto con un indice di precisione inferiore rispetto ad un'altra che ha permesso di curare ogni dettaglio, il fulcro importante per la buona realizzazione di ogni progetto di ricerca è riuscire a trovare sempre la soluzione migliore mediando tra le risorse umane e finanziarie a disposizione ed il grado di accettabilità che si intende conseguire.

APPENDICE

O (X_0, Y_0, Z_0)	=	centro ottico
PP (ξ_0, η_0)	=	punto principale: proiezione dell'asse ottico sul fotogramma
P (X, Y, Z)	=	punto oggetto
P' (ξ, η)	=	punto immagine
FC	=	centro materiale del fotogramma
PN	=	punto normale: intersezione tra il fotogramma e la perpendicolare dal centro ottico all'oggetto
f	=	lunghezza focale

EQUAZIONI DI COLLINEARITÀ[119]:

$$\xi = \xi_0 - f\,\frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

$$\eta = \eta_0 - f\,\frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

Parametri di orientamento interno:

f = lunghezza focale

ξ_0, η_0, = coordinate del punto principale (PP)

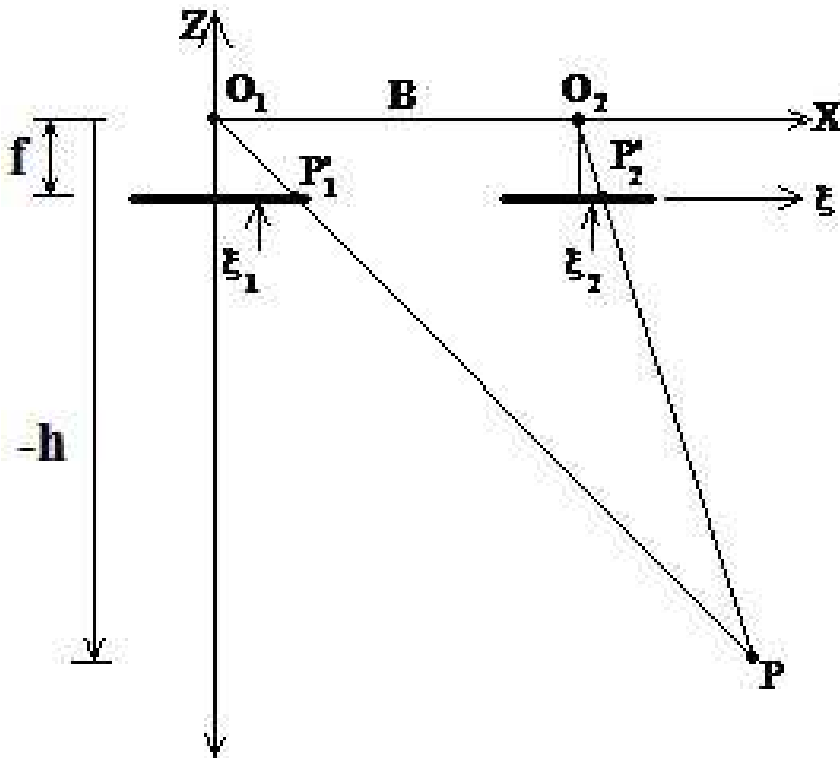
Parametri di orientamento esterno:

X_0, Y_0, Z_0 = coordinate assolute del centro di presa (O)

ω, ϕ, κ = tre rotazioni d'assetto

⇒ **r** = matrici di rotazione

[119] Per tutte le formule qui citate cfr. DORE 1938, pp. 15-65.

SCHEMA NORMALE o NADIRALE:

B = distanza tra i due fotogrammi

Fotogramma 1 $X = h \dfrac{\xi_1}{-f}$ $Y = h \dfrac{\eta_1}{-f}$

Fotogramma 2 $X = B + h \dfrac{\xi_2}{-f}$ $Y = h \dfrac{\eta_2}{-f}$

Da notare che nello schema normale la parallasse trasversale è sempre nulla:

$\eta = \eta_1 - \eta_2 = 0$ = parallasse trasversale

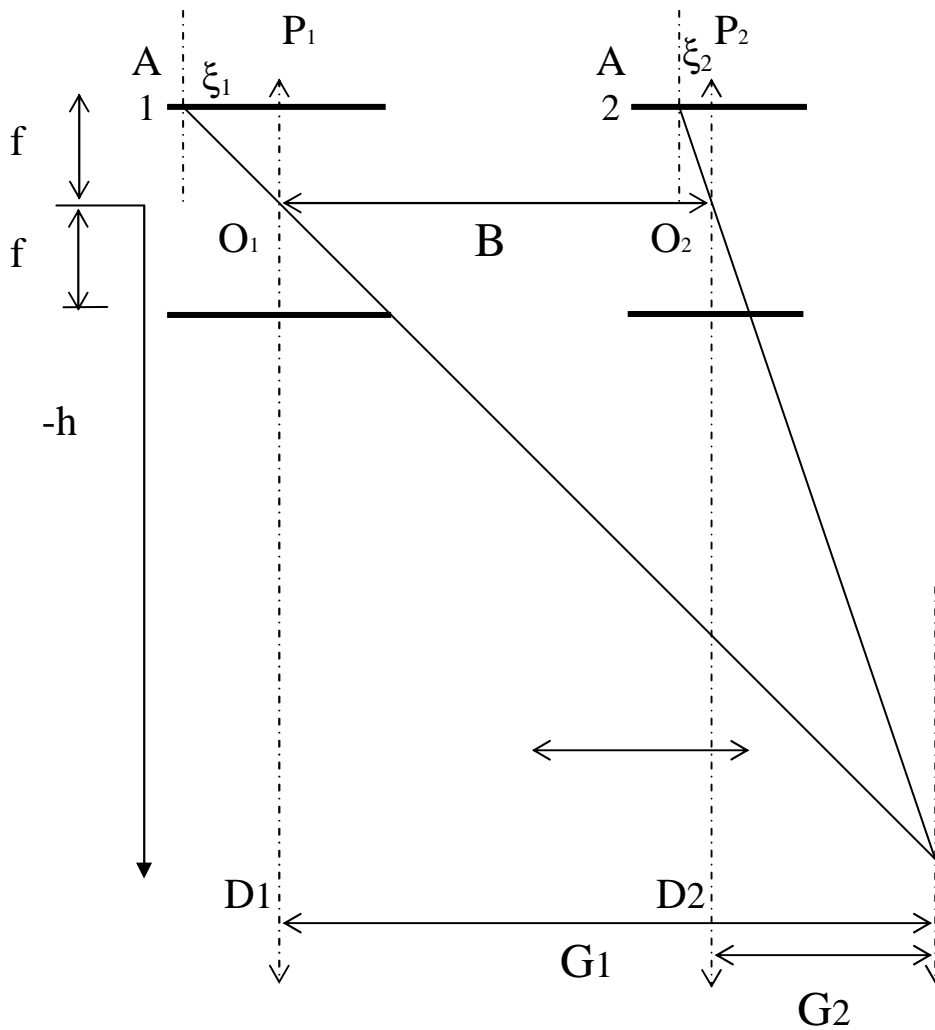
Dalle prime due equazioni si ricava il valore dell'altezza (h):

$$-h\frac{\xi_1}{f} = B - h\frac{\xi_2}{f} \qquad \Rightarrow \quad -h = \frac{B \cdot f}{\xi_1 - \xi_2} = \frac{B \cdot f}{p_\xi}$$

$P_\xi = \xi_1 - \xi_2$ = parallasse longitudinale

Per cui i valori di X e di Y equivalgono a:

$$X = -h\frac{\xi_1}{f} = \frac{B \cdot f}{\xi_1 - \xi_2} \cdot \frac{\xi_1}{f} \quad = \frac{f \cdot \xi_1}{\xi_1 - \xi_2} = \frac{B \cdot \xi_1}{p_\xi}$$

$$Y = -h\frac{\eta_1}{f} = \frac{B \cdot f}{\xi_1 - \xi_2} \cdot \frac{\eta_1}{f} \quad = \frac{B \cdot \eta_1}{\xi_1 - \xi_2} = \frac{B \cdot \eta_1}{p_\xi}$$

E' possibile notare che i triangoli $A_1 P_1 O_1$ e $D_1 P O_1$ sono simili, così come i triangoli $A_2 P_2 O_2$ e $D_2 P O_2$.

Da questo si stabilisce la seguente relazione: $$\frac{G1 - G2}{\xi 1 - \xi 2} = \frac{h}{f}$$

da cui: $$h = f \frac{G1 - G2}{\xi 1 - \xi 2}$$

e poiché: (G1- G2) = B

si ottiene: $$h = \frac{f \cdot B}{\xi 1 - \xi 2}$$ e $$f = \frac{h \cdot (\xi 1 - \xi 2)}{B}$$

ELENCO DELLE FIGURE

Fig. 6.2-10: *Incremento delle lunghezze delle rette passanti tra i centri ottici delle immagini ed i punti omologhi rilevati, all’interno di uno stesso fotogramma.*

Fig. 6.2-11: *Restituzione tridimensionale del sito eseguita con Rhinoceros.*

BIBLIOGRAFIA

Atkinson Karen, Duncan Alec, Green Jeremy, 1988, *The application of a least squares adjustment program to underwater survey*, in "The International Journal of Nautical Archaeology" vol. 17(2), pp. 113-118.

Atkinson Karen, Green Jeremy, Harper Rosemary, Intakosai Vidya, 1989, *Joint Thai-Australian underwater archaeological project 1987-1988 - Part 1: Archaeological survey of wreck site in the Gulf of Thailand, 1987-1988*, in "The International Journal of Nautical Archaeology" vol. 18(4), pp. 299-315.

Bass George F., 1970, *Archaeology Under Water*, New York.

Bass George F., 2005, *Beneath the seven seas - Adventures with the Institute of Nautical Archaeology*, Londra.

Bass George, Van Doorninck Frederick H., 1982, *Yassi Ada - A Seventh-Century Byzantine Shipwreck - Volume I*, College Station - Texas.

Beltrame Carlo, 2004, *Lignano, relitto del brick italo-francese Mercure, seconda campagna di scavo sottomarino*, in "Archeologia Postmedievale" vol. 8, p. 207.

Beltrame Carlo, 2005 a, *Lignano, relitto del brick del Regno italico Mercure*, in "Archeologia Postmedievale" vol. 9, p.195.

Beltrame Carlo, 2005 b, *Seconda campagna di scavo sul relitto del Mercure*, in "L'archeologo subacqueo" vol.31, pp. 5-6.

Beltrame Carlo, 2005 c, *Terza campagna di scavo sul relitto del Mercure*, in "L'archeologo subacqueo" vol. 33, pp. 11.

Beltrame Carlo, 2006 a, *IV Campagna di scavo sul relitto del Mercure*, in "L'archeologo subacqueo" vol. 34-35, p. 22.

Beltrame Carlo, 2006 b, *Punta Tagliamento - Lignano, Relitto del brick del Regno italico Mercure (1812)*, in "Archeologia Postmedievale" vol. 10.

Beltrame Carlo, 2007, *Il Mercure - Il relitto del brick del Regno italico affondato nel 1812 nella battaglia di Grado*, in Fozzati L. (a cura di), "Caorle archeologica - Tra mare, fiume e terra", Venezia, pp. 137-146.

Beltrame Carlo, 2008, *Elementi per un' archeologia dei relitti navali di età moderna - L'indagine di scavo sottomarino sul brick Mercurio*, in Gelichi S. (a cura di), "Missioni archeologiche e progetti di ricerca e scavo dell'Università Ca' Foscari - Venezia, VI Giornata di studio", Venezia, pp. 219-227.

Beltrame Carlo, 2009, *The excavation of the brick Mercure of the Regno Italico (1812). Why to investigate a military vessel from the beginning of the 19th century?*, in Bockius R. (ed.), "Between the Seas. Transfer and exchanges in nautical technology. Proceedings of the XI International Symposium on Boat and Ship Archaeology, Mainz 2006", Mainz, pp. 249-256.

Beltrame Carlo, 2010, *Elementi per un'archeologia dei relitti navali di età moderna. L'indagine di scavo sottomarino sul brick Mercurio*, in Medas S., D'Agostino M., Caniato G. (a cura di), "Archeologia, storia, etnologia navale, Atti del I convegno nazionale (Cesenatico 2008)", Bari, pp. 55-61.

Beltrame Carlo, 2012, *Archeologia marittima del Mediterraneo - Navi, merci e porti dall'antichità all'età moderna*, Roma.

Beltrame Carlo, Gaddi Dario, 2002, *Report on the first research campaign at the wreck of the Napoleonic brick, Mercure, Lignano, Udine*, in "The International Journal of Nautical Archaeology" vol. 31(1), pp. 60-73.

Beltrame Carlo, Gaddi Dario, 2003, *Mercure (Lignano), relitto del brick napoleonico, 2001*, in "Archeologia Postmedievale" vol. 7, p. 276.

Beltrame Carlo, Gaddi Dario, 2004, *Resoconto della prima campagna di indagine sul relitto del brick napoleonico Mercure (Lignano - UD)*, in Benini A., Giacobelli M. (a cura di), "Atti del II Convegno nazionale di archeologia subacquea, Castiglioncello, 2001", Bari, pp. 125-134.

Beltrame Carlo, Fozzati Luigi, 2006, *Lo scavo del relitto del brick del Regno Italico Mercure (1812) - Formazione e ricerca in archeologia marittima sui fondali di Punta Tagliamento*, in Zaccaria A. (a cura di), "Le missioni archeologiche dell'Università Ca' Foscaridi Venezia - Giornata di studi", Venezia, pp. 167-174.

Beltrame Carlo, Nicolardi Mariangela, 2009, *Il relitto del Mercurio e la battaglia di Grado (1812) - Archeologia sui fondali dell'Alto Adriatico*, Lignano Sabbiadoro.

Beltrame Carlo, Vittorio Valeria, 2012, *Lapidariae naves? Roman ships carryng marble: were these vessels in some way special?*, in Gunsenin N. (ed.), "Between Continents. Proceedings of the XII International Symposium on Boat and Ship Archaeology, Istanbul 2009", Istanbul, pp. 141.148.

Beltrame Carlo, Lazzarini L., Medaglia S., 2012, *Underwater Investigation on a Marble Cargo Wreck at Capo Bianco near Isola di Capo Rizzuto, Crotone, Italy*, in "The International Journal of Nautical Archaeology" vol. 41(1), pp. 3-16.

Bertoldi Francesca, 2007, *I resti osteologici umani*, in Beltrame C., Fozzati L. (ed.), "Caorle archeologica - Tra mare, fiume e terra", Venezia, pp. 147-149.

Boudriot Jean, Berti Hubert, 1981, *Le Cygne 1806-1808*, Parigi.

Bowens Amanda (ed.), 2009, *Underwaer Archaeology - The NAS Guide to Principles and Practice - Second Edition*, Portsmouth.

Brusić Zdenko, 1976, *Byzantine amphorae (9th-12th century) from eastern Adriatic underwater sites*, in "Archaeologia Iugoslavica" vol. 17, Belgrado, pp. 37-49.

Canciani Marco et alii, 2003, *Low cost digital photogrammetry for underwater archaeological site survey and artifact isertion - The case study of the dolia wreck in Secche della Meloria - Livorno - Italia,* in "Atti del ISPRS 2003", Ancona, pp. 95-100.

Catsambis Alexis, Ford Ben, Hamilton Donny L, 2011, *The Oxford handbook of Maritime Archaeology*, Oxford.

Comini Alessia, Cristian Umili, 2011, *La fotografia subacquea in digitale*, Milano.

Crumlin-Pedersen Ole, 1977, *Some principles for the recording and presentation of ancient boat structures*, in McGrail S.(ed.), "Sources and techniques in boat archaeology", pp. 163-177.

D'Annibale Giuseppe, 2005, *Fotogram – Restituzione 2D e 3D dalle fotografie*, Palermo.

Davino M., Iardino F., Tosi A., 2010, *Fotografia digitale subacquea*, Torino.

Dean Martin, Ferrari Ben, Oxley Ian, Redknap Mark, Watson Kit, 1992, *Archaeology Underwater - The NAS Guide to Principles and Practice*, Londra.

Della Libera Duilio, 2008, *Manuale del rilevamento archeologico subacqueo*, Trento.

Demesticha Stella, 2011, *The 4-th-Century-BC Mazotos Shipwreck, Cyprus: a preliminary report*, in "The International Journal of Nautical Archaeology" vol. 40(1), pp. 39-59.

Dore Paolo, 1938, *Fondamenti di fotogrammetria: topografia da terra e da aerei*, Bologna.

Drap Pierre, 2012, *Underwater Photogrammetry for Archaeology*, in Da Silva D. C., "Special Applications of Photogrammetry", Rijeka, pp. 111- 136.

Drap Pierre, Grussenmeyer Pierre, 2000, *Teaching architectural photogrammetry on the Web with ARPENTEUR*, in "International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing" vol. 33, Amsterdam.

Drap Pierre, Grussenmeyer Pierre, Gaillard Gilles, 2002, *ARPENTEUR as Web based photogrammetric package: towards interoperability through a XML structure for photogrammetric data*, in "ISPRS Comm. V Symposium, Corfou: Greece (2002)", Corfù.

Drap Pierre et alii, 2002, *Underwater photogrammetry and XML based documentation system: The case of the 'Grand Ribaud F' Etruscan wreck*, in "ISPRS Comm. V Symposium, Corfou: Greece (2002)", Corfù.

Drap Pierre et alii, 2005, *Integration of multi-source spatial information and XML information system in underwater archaeology*, in "CIPA 2005 XX International Symposium – The CIPA International Archive" Vol. 20, Torino.

Drap Pierre, Seinturier Julien, Long Luc, 2003, *Archaeological 3D Modelling using digital photogrammetry and Expert System. The case study of Etruscan amphorae*, in "The fifth international conference on computer graphics and artificial intelligence. Limoges (France), 14-15 of may 2003", Limoges.

Felici Enrico, 2002, *Archeologia subacquea - Metodi, tecniche, strumenti*, Roma.

Fioravanti Alessandro, 1974, *La fotografia stereoscopica applicata allo scavo archeologico subacqueo*, in "Atti del I simposio nazionale - Comitato Italiano Ricerche e Studi Subacquei", Roma.

Fioravanti Alessandro, 1989 (I Edizione 1971), *Tecnica d'archeologia subacquea*, Roma.

Gianfrotta Piero A., Pomey Patrice, 1980, *L'archéologie sous la mer - histoire, techniques, découvertes et épaves*, Parigi.

Green Jeremy, 1990, *Maritime Archaeology - A Technical*, Londra.

Green Jeremy, 2004, *Maritime Archaeology - A Technical Handbook - Second edition*, Londra.

Grioni Claudio, 1988, *Guerra anglo-francese in Adriatico al tramonto dell'Impero Napoleonico*, in "Archeografo Triestino" vol. XLVIII (= XCVI), pp. 121-145.

Hurtos Natalia, Cufì Xavier, Salvi Joaquim, 2010, *Integration of optical and acoustic sensors for 3D underwater scene reconstruction*, in "Instrumentation Viewpoint" vol. 8, Barcellona.

Long Luc, 1987, *Les épaves du Grand Congloué*, in "Archeonautica" vol. 7, pp. 9-36.

Long Luc, 1998, *Ricerche archeologiche in acque profonde. Verso uno scavo interamente robotizzato*, in Gianfrotta P. A., Maniscalco F. (a cura di), "Forma Maris - Atti del Forum internazionale di Archeologia Subacquea", Pozzuoli.

Mantini Paolo, 2007, *Fotoraddrizzamento, Fotomosaico-vettorizzazione, Restituzione prospettica automatizzata*, Palermo.

Martin Colin J., Martin Edward A., 2002, *An underwater photomosaic technique using Adobe Photoshop*, in "The International Journal of Nautical Archaeology" vol. 31(1), pp. 137-147.

Medaglia Salvatore, 2010, *Carta archeologica della provincial di Crotone – Paesaggi storici e insediamenti nella Calabria centro-orientale dalla Preistoria all'Altomedioevo,* Cosenza.

Picozzi Sandro, 1984, *Le grandi avventure dell'archeologia subacquea - storia e tecnica dei più famosi ritrovamenti*, Roma.

Poidebard Antoine, 1939, *Un grand port disparu: Tyr - Recherches aériennes et sous-marines, 1934-6*, in "Bibliothèque archéologique et historique du Service des Antiquités de Syrie et au Liban" vol. 29, Parigi.

Rebikoff Dimitri, 1972, *Precision underwater photomosaic techniques for archaeological mapping Interim experiment on the Bimini "Cyclopean" complex*, in "The International Journal of Nautical Archaeology" vol. 1, pp. 184-186.

Roffi Renato, 1984, *La nave romana di Procchio*, in "Archeologia sottomarina".

Roghi Gianni, 1959, *Note tecniche sul rilevamento e lo scavo della nave romana di Spargi*, in "Bollettino e Atti (Centro Italiano de Ricercatori Subacquei)", pp. 9-20.

Rosso Antonio, 1997, *Introduzione all'archeologia delle acque - Il rilevamento dei manufatti sommersi - Seconda edizione*, Pordenone.

Schank Toni, 2005, *Introduction to photogrammetry*, Columbus.

Skarlatos D., Demesticha S., Kiparissi S., 2012, *An ‘Open’ Method for 3D Modelling and Mapping in Underwater Archaeological Sites*, in "International Journal of Heritage in the Digital Era" vol.1 (1), pp. 1-24.

Tailliez Philippe, 1960, *Nouvelles plongées sans cable*, Parigi.

Zmaić Vesna, Miholjek Igor, 2011, *Medieval Byzantine Shipwrecks in the Eastern Adriatic*, in "Skyllis" vol. 11(1), pp. 94-99.

Zmaić Vesna, 2012, *Bizantski srednjovjekovni brodolomi u podmorju istocnog jadrana*, in "Histria Antiqua" vol. 21, pp. 471-482.

BIBLIOGRAFIA ELETTRONICA:

Enciclopedia online Treccani: *http://www.treccani.it*

Enciclopedia online Wikipedia: *http://it.wikipedia.org*

3H Consulting - Site Recorder software: *http://www.3hconsulting.com*

Alessandro Fioravanti - sito internet ufficiale: *http://www.alessandrofioravanti.it*

Autopano-Sift software: *http://user.cs.tu-berlin.de/~nowozin/autopano-sift/*

Enblend software: *http://enblend.sourceforge.net/*

Hugin software: *http://hugin.sourceforge.net*

Interactive Oceans: *http:// interactiveoceans.washington.edu*

Quantum Gis: *http://www.qgis.org*

Smartblend software: *http://wiki.panotools.org/SmartBlend*

RINGRAZIAMENTI

Alla fine di questo lavoro mi sento di ringraziare tantissimo, prima di tutto, i miei genitori Mara e Massimo insieme alla nonna Lucia che mi sono stati sempre vicini, incoraggiandomi soprattutto nei momenti più difficili: senza di loro non sarei arrivato fino a qui.

Ringrazio anche Daniela che ha assistito costantemente ai lavori finali non smettendo mai di credere in me.

A Massimo Galvan un ringraziamento speciale per la sua sincera amicizia e per avermi guidato nel mio percorso subacqueo spronandomi sempre a migliorare e ad Enzo Lanzilotti amico fedele e compagno irrinunciabile di immersioni che non ha mancato di darmi preziosi consigli nel settore della fotografia.

Ringrazio altresì Elisa Costa, Stefania Manfio e Sophiaia Donadel che mi hanno accompagnato nel percorso universitario, non risparmiandosi mai nell'aiutarmi quando necessario, condividendo con me le speciali esperienze di scavi archeologici subacquei; insieme abbiamo costruito una parte importante della nostra formazione.

La mia riconoscenza va in modo particolare al professor Carlo Beltrame per avermi indicato l'argomento di questa tesi e perché, introducendomi nel mondo dell'archeologia subacquea, mi ha guidato con attenzione e grande professionalità non mancando mai di darmi consigli quando ne avevo bisogno.

Non posso non ringraziare il professor Bruce Hartzler che, via mail, mi ha assistito nei primi passi di questo lavoro spiegandomi pazientemente come realizzare fotomosaici secondo la tecnica da lui elaborata.

Infine un grazie speciale va a Stefano Caressa il quale, con lo stile che gli è proprio e la sua grande disponibilità, mi ha fornito materiale e spiegazioni necessari per apprendere le tecniche della fotogrammetria.

Mi sento infine di ringraziare tutti gli insegnanti che ho incontrato sul mio cammino di studente e tutti coloro che a vario titolo hanno contribuito per farmi giungere fin qui.

Ancora grazie.